

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

FABRICATION DE FILTRES INTERFERENTIELS PAR DEPOT PECVD POUR L'ECLAIRAGE LED

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Joffrey BELIN

Jury : Vincent AIMEZ (directeur)
Abdelatif JAOUAD (co-directeur)

RÉSUMÉ

Grâce à leur haute efficacité et leur durée de vie plus longue, les LED sont de plus en plus utilisées pour l'éclairage, et particulièrement depuis ces dernières années, pour l'éclairage public. Toutefois, le spectre d'émission d'une LED diffère de celui d'une ampoule à incandescence ou à décharge, avec notamment des longueurs d'onde dont l'amplitude est plus élevée dans le domaine du bleu. Il a été démontré que ces longueurs d'onde bleues réduisent la sécrétion de mélatonine, une hormone qui, en plus de ses propriétés anti-oxydantes et anti-cancérigènes, permet de réguler l'horloge biologique du corps humain. La carence de mélatonine peut provoquer des états de fatigue et de stress, pouvant conduire dans certains cas à la dépression. Les longueurs d'onde rouges et proche-IR issues d'éclairages LED ou incandescent ont également des effets négatifs sur l'environnement, puisqu'elles perturbent les cycles de la végétation, comme la photosynthèse. Ces problèmes de santé publique sont connus des autorités, si bien qu'elles imposent des normes pour réduire l'émission de longueurs d'onde bleue, rouge et proche-IR issues de l'éclairage public (ex. norme BNQ 4930-100 au Québec). Dans ce projet, nous proposons des filtres interférentiels permettant d'éliminer les longueurs d'onde nuisibles issues d'un éclairage LED, sans impacter la qualité et l'efficacité de cet éclairage. En utilisant la technique de dépôt PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), nous avons développé des matériaux optiques innovants qui permettent de réaliser des filtres efficaces, simples et à faible coût.

Mots-clés :

- Light-emitting diode (LED)
- Design multicouches
- Interférences destructives et constructives
- Propriétés optiques des couches minces
- Dépôt PECVD
- Dispositifs à couches minces

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais dans un premier temps remercier mes directeurs de recherches, Vincent Aimez et Abdelatif Jaouad qui m'ont fait confiance et m'ont offert l'opportunité de participer à ce projet.

Je remercie particulièrement Abdelatif Jaouad. Je lui dois une aide académique précieuse ainsi qu'un support permanent. Le partage de ses compétences dans les propriétés optiques des matériaux a largement contribué à la réussite de ce projet.

J'étends ma gratitude à tout le personnel technique des salles blanches du 3IT. Leurs services rendus ont permis de gagner de nombreuses heures de travaux sur l'avancée du projet.

Enfin, je voudrais remercier toutes les personnes au sein du 3IT avec qui j'ai pu échanger sur ce projet, pour leurs discussions et intérêt à mon travail.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	REVUE DE LITTERATURE.....	5
	2.1 Filtrage interférentiel	5
	2.1.1 Filtres de Fabry-Perot.....	7
	2.1.2 Filtres interférentiels à couches minces.....	8
	2.2 Méthodes de dépôt pour la fabrication de filtres interférentiels.....	12
	2.2.1 Pulvérisation cathodique	12
	2.2.2 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD).....	13
3	CONCEPTION, FABRICATION ET CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL PECVD	15
	3.1 Fabrication of low-cost interference filters for LED lighting using PECVD...	16
	3.1.1 Introduction.....	16
	3.1.2 Optimization of optical properties of PECVD materials.....	19
	3.1.3 Uniformity of the PECVD SiO _x and Si-rich Si _x N _y thin films.....	21
	3.1.4 Results and discussions.....	23
	3.1.5 Conclusion.....	27
	3.1.6 Acknowledgments	28
	3.2 Conclusion.....	28
4	METHODES DE FABRICATION DU FILTRE INTERFERENTIEL PECVD.....	31
	4.1 Simulations de filtres interférentiels avec Essential Macleod.....	31
	4.2 Influence du substrat sur la vitesse de déposition.....	32
	4.3 Réalisation du filtre.....	33
5	PERSPECTIVES D'AMELIORATION DU FILTRE INTERFERENTIEL PECVD.....	35
	5.1 Modification de l'angle d'optimisation.....	35
	5.2 Simulation du filtre interférentiel optimisé pour un angle de 55°.....	36
	5.2.1 Influence de l'angle d'incidence sur la réponse spectrale.....	38
	5.2.2 Influence de l'angle d'incidence sur le rendu colorimétrique.....	39
	5.3 Conclusion.....	40
6	CONCLUSION.....	41

LISTE DES FIGURES

1.1	Comparaison des spectres d'émission d'une LED et d'une ampoule incandescente	1
1.2	« Melatonin Suppression Action Spectrum » (MSAS) [4]. La sécrétion de mélatonine est fortement réduite, voir stoppée pour de longueurs d'onde aux alentours de 450 nm.	2
2.1	Principe de base des interférences lumineuses	5
2.2	(a) Principe de fonctionnement d'un filtre de Fabry-Perot [15]. (b) Réponse spectrale normalisée en fréquence d'un filtre de Fabry-Pérot [15].....	7
2.3	Représentation schématique de la structure d'un filtre interférentiel à couches minces	9
2.4	Réponse spectrale d'un filtre interférentiel à couches minces de 16 couches (a), 22 couches (b) et 28 couches (c) pour des applications de filtrage de LED blanches, développés par LEKLA Inc. [6].....	11
3.1	(a) Melatonin Suppression Action Spectrum [4]. High values correspond to a reduction of the melatonin secretion. (b) Ideal spectral response of a LED I-F to correctly attenuate blue, red and IR wavelengths without impacting the rest of the visible spectrum.....	18
3.2	Refractive index (a) and extinction coefficient (b) of Si-rich Si_xN_y for different ratios of silane/ammonia. Both refractive index and extinction coefficient increase when this ratio increases.....	20
3.3	Simulation of the spectral response of a 6-layer structure PECVD LED I-F. Si-rich Si_xN_y -A, B and C is used as the HRI material in figure (a), (b) and (c) respectively. PECVD SiO_x is used as the LRI material for all 3 figures. All simulated structures were designed to fit the targeted spectrum at 0° incidence angle.....	21
3.4	(a) Impact of a ± 0.31 % thickness error on the SiO_x layers on the spectral response. (b) Impact of a ± 5.62 % thickness error on the Si-rich Si_xN_y -B layers on the spectral response.....	22
3.5	(a) Relative thickness standard deviation of the Si-rich Si_xN_y -B thin film with respect to the deposition pressure at 300°C and 350°C . (b) Optical properties of the Si-rich Si_xN_y -B thin film with respect to the deposition pressure at 300°C and 350°	23
3.6	(a) Spectral response of the 6-layer PECVD I-F measured with a spectrophotometer at 0° incidence angle. (b) Simulation of the emission spectrum of a white LED through the 6-layer PECVD LED I-F and through the 16-layer sputtering LED I-F.....	24
3.7	Emission spectra of the <i>Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5</i> white LED through the 6-layer PECVD LED I-F (a) and through the 16-layer sputtering LED I-F (b) for different incidence angles.....	26

3.8	Correlated Color Temperature (CCT) in Kelvin of the <i>Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5</i> white LED through the 6-layer PECVD LED I-F and through the 16-layer sputtering LED I-F, with respect to the incidence angle.....	27
4.1	Courbe de dépôt du Si-rich Si_xN_y . Epaisseur de la couche de Si-rich Si_xN_y en fonction de la durée du dépôt, sur un substrat de silicium (noir) et un substrat de Pyrex (rouge)	33
4.2	Méthodologie itérative utilisée pour la fabrication du filtre interférentiel avec la technique PECVD.....	34
5.1	(a) Illustration du cône d'émission d'une source lumineuse. (b) Emission de la LED <i>Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5</i> en fonction de l'angle d'incidence.	36
5.2	(a) Simulation de la réponse spectrale d'un filtre interférentiel à 6 couches fabriqué par PECVD et optimisé pour un angle de 55° . (b) Simulation de l'émission spectrale d'une LED blanche à travers un filtre interférentiel fabriqué par PECVD (6 couches) et à travers un filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation cathodique (16 couches), tous deux optimisés pour un angle de 55°	37
5.3	Spectre d'émission de la LED blanche <i>Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5</i> à travers le filtre interférentiel 6 couches fabriqué par PECVD (a) et à travers le filtre interférentiel 16 couches fabriqué par pulvérisation cathodique (b), pour différents angles d'incidence. Les deux filtres ont été optimisés pour un angle d'incidence de 55°	38
5.4	Température de couleur (CCT) en Kelvin de la LED blanche <i>Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5</i> à travers le filtre interférentiel fabriqué par PECVD et à travers le filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation, en fonction de l'angle d'incidence.	39

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Détails d'une structure à 16 couches d'un filtre interférentiel à couche mince composé de SiO_x et TiO_2 [6].....	10
3.1	Gas flow rates and optical properties of SiO_x and Si-rich Si_xN_y	20
3.2	Detailed structure of a 6-layer PECVD LED I-F.....	24
3.3	Résumé et comparaison des deux technologies de filtres interférentiels.....	29
5.1	Structure détaillée d'un filtre interférentiel à 6 couches optimisé pour un angle d'incidence de 55°	37

LISTE DES SYMBOLES

Les symboles sont définis selon leur ordre d'apparition dans le texte

Symbole	Définition
n	Indice de réfraction (sans unité)
k	Coefficient d'extinction (sans unité)
λ	Longueur d'onde (nm)
T	Période (s)
c	Célérité de la lumière dans le vide (3.10^8 m.s^{-1})
R	Coefficient de réflexion (%)
T	Coefficient de transmission (%)
A	Coefficient d'absorption (%)

LISTE DES ACRONYMES

Les acronymes sont définis selon leur ordre d'apparition dans le texte

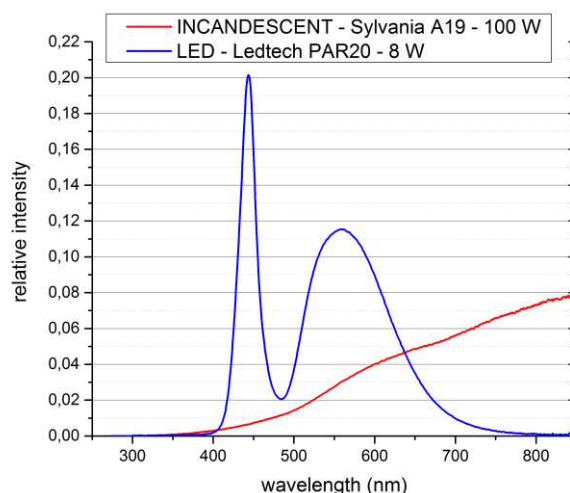
Acronyme	Définition
LED	Light-Emitting Diode
DEL	Diode Electroluminescente
MSAS	Melatonin Suppression Action Spectrum
IR	Infrarouge
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
SiO _x	Oxyde de silicium
TiO ₂	Dioxyde de titane
PVD	Physical Vapor Deposition
Ar ⁺	Ion argon
Si	Silicium
Ti	Titane
CVD	Chemical Vapor Deposition
TFT	Thin Film Transistor
LCD	Liquid Crystal Display
SiON	Oxynitride de silicium
Si ₃ N ₄	Nitride de silicium
Si-rich Si _x N _y	Silicon-rich silicon nitride (ou nitride de silicium enrichi en silicium)
NH ₃	Ammoniac
SiH ₄	Silane
LED I-F	LED interference filter (ou filtre interférentiel pour LED)
HRI	High Refractive Index (ou fort indice de réfraction)
LRI	Low Refractive Index (ou faible indice de réfraction)
nc-Si	Silicon nanocrystals (ou nanocristal de silicium)
CCT	Correlated Color Temperature (ou température de couleur proximale)

CHAPITRE 1.

INTRODUCTION

L'utilisation de LED (Light-Emitting Diode, ou DEL, Diode Electroluminescente) pour les systèmes d'éclairage est aujourd'hui de plus en plus fréquente [1]–[3]. Cela est dû d'une part à la meilleure efficacité lumineuse (conversion de l'énergie électrique en énergie lumineuse visible) des LED comparé aux ampoules incandescentes (supérieure à 100 lm/W pour une LED [3], contre 10 lm/W pour une ampoule incandescente [3]). De ce fait, pour une même puissance lumineuse émise dans le visible (de 400 à 700 nm), une LED consommera environ 10 fois moins d'énergie électrique qu'une ampoule incandescente traditionnelle. D'autre part, les progrès en micro et nanotechnologie ont permis de réduire le coût de fabrication des LED (de 12,5 \$/klm en 2011 à 2,3 \$/klm en 2015 [3]), les rendant plus abordables, avec à la clé un retour sur investissement plus rapide. Enfin, la meilleure fiabilité et durée de vie des LED (100 fois plus longue que l'incandescent [2] et 10 fois plus longue que le fluorescent [2]) permettent de réduire d'importants surcoûts de maintenance et de remplacement.

Conscientes des importantes économies qu'elles peuvent réaliser, les municipalités et les collectivités, ainsi que les compagnies privées ont commencé à utiliser des luminaires à base de LED pour l'éclairage public afin d'illuminer les rues, les routes, les devantures de bâtiments ou encore les centres commerciaux.



Toutefois, le spectre d'émission d'une LED blanche est différent de celui d'une ampoule incandescente, avec notamment une émission élevée dans les longueurs d'onde bleues, aux alentours de 450 nm, comme indiqué sur la figure 1.1

Il a été démontré que le fait d'être soumis à un éclairage artificiel

Figure 1.1 : Comparaison des spectres d'émission d'une LED et d'une ampoule incandescente

composé d'une forte émission dans ces longueurs d'onde bleues pouvait provoquer des effets négatifs sur la santé humaine [4]–[6]. De même, les longueurs d'onde dans le rouge et proche infrarouge (IR), de 650 à 800 nm issues d'un éclairage incandescent ou LED peuvent avoir des répercussions sur l'environnement [4]–[8].

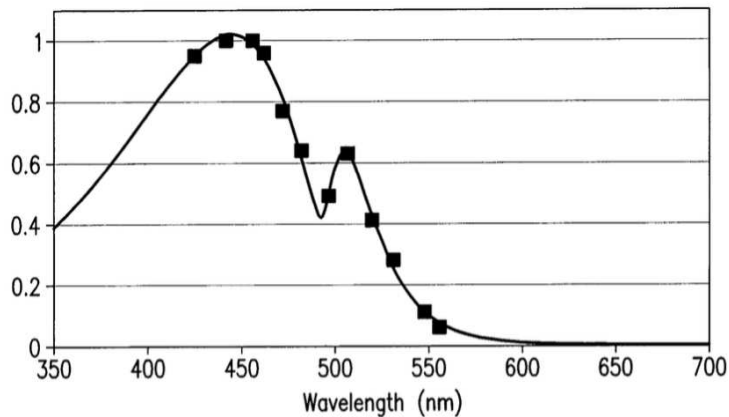


Figure 1.2 : « Melatonin Suppression Action Spectrum » (MSAS) [4]. La sécrétion de mélatonine est fortement réduite, voir stoppée pour des longueurs d'onde aux alentours de 450 nm.

Les longueurs d'onde bleues, typiquement entre 400 et 450 nm réduisent drastiquement la sécrétion de mélatonine [4], comme indiqué sur la figure 1.2. La mélatonine est une hormone aux propriétés bénéfiques multiples (anti-oxydante [9], anti-cancérigène [10], etc.) sécrétée par le corps humain. Elle permet également de réguler le cycle

circadien [4]–[6], [9], [10], plus communément appelé horloge biologique. En absence de longueur d'onde bleue, par exemple après le coucher du soleil, le corps humain va sécréter la mélatonine qui va conditionner notre organisme dans un état de repos. C'est ainsi que nous sommes naturellement fatigués quelques heures après la tombée de la nuit. Au lever du jour, le rayonnement bleu de la lumière du soleil va stopper la sécrétion de mélatonine, conditionnant cette fois-ci notre organisme dans un état actif : c'est le réveil. La mélatonine est donc « *un transducteur du signal lumineux donnant l'indication à l'organisme de la durée du jour et de la nuit* » [11]. Cependant, si nous sommes soumis à un éclairage artificiel avec un rayonnement bleu trop élevé après la tombée de la nuit, la carence de mélatonine va empêcher l'organisme d'entrer dans cet état de repos, retardant ainsi l'endormissement. Le réveil le lendemain matin sera d'autant plus pénible : le cycle du sommeil est dérégulé. A long terme, ce dérèglement peut provoquer de la fatigue, du stress, ou de l'insomnie, pouvant conduire dans le pire des cas à la dépression [4], [5]. La lumière bleue contribue également davantage à l'augmentation de la pollution lumineuse [6], [12], puisque les yeux sont plus sensibles aux longueurs d'ondes bleues qu'aux rouges [13]. L'une des conséquences notable de la pollution

lumineuse est la perturbation des oiseaux migrateurs, qui se déplacent principalement la nuit [14].

En ce qui concerne le rayonnement rouge et proche infrarouge issus de sources lumineuses artificielles, il est connu pour perturber la végétation. En effet, la chlorophylle des plantes vertes possède un pic d'absorption compris entre 650 et 750 nm permettant d'activer la réaction de photosynthèse [7], qui n'est pas censé se produire la nuit. Ce rayonnement infrarouge augmente également la mortalité des insectes, qui sont attirés par les sources d'éclairage artificiel, de même que leurs prédateurs [6], [8].

Les autorités gouvernementales sont au courant de ces problèmes de santé et d'environnement, et c'est pour cette raison que certaines d'entre-elles imposent des normes afin de limiter le rayonnement bleu et infrarouge des sources lumineuses utilisées pour l'éclairage public, comme par exemple la norme BNQ 4930-100 au Québec. Les économies d'énergie réalisables grâce à l'emploi de LED ne peuvent être faites au détriment de notre santé, notre bien-être ou notre environnement. Des solutions pour réduire les émissions bleues et infrarouges des systèmes d'éclairage public à LED doivent être trouvées, aussi bien sur les systèmes déjà installés que sur les futurs systèmes à produire. Ces solutions ne devront pas nuire à la qualité de l'éclairage, afin que ce dernier reste sécuritaire et confortable. De ce fait, il existe bel et bien un marché de systèmes d'éclairage public à LED très peu énergivores, avec des émissions réduites dans le bleu, le rouge et le proche infrarouge.

L'objectif de ce projet de recherche est de démontrer qu'il est possible de fabriquer des filtres permettant de réduire l'impact négatif sur la santé et l'environnement des longueurs d'onde bleues, rouges et infrarouges issues d'un éclairage LED, tout en conservant le reste du spectre visible afin de ne pas nuire à la qualité de l'éclairage en terme de confort et de sécurité. L'utilisation de la technique PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) permettra de réduire le coût et la complexité de ces filtres, et d'assurer une meilleure reproductibilité de leur procédé de fabrication.

CHAPITRE 2.

REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Filtrage interférentiel

Afin d'atténuer les composantes bleues, IR et proche-IR tout en conservant le reste du spectre visible d'un éclairage LED, une technique de filtration sélective appelée filtrage interférentiel sera employée. Cette technique est largement répandue puisqu'elle couvre de nombreux domaines de l'optique et de l'optoélectronique, des ultraviolets jusqu'aux infrarouges. Elle est basée sur les interférences destructives et constructives générées lorsqu'un rayon lumineux traverse des couches de matériaux d'indice de réfraction différent.

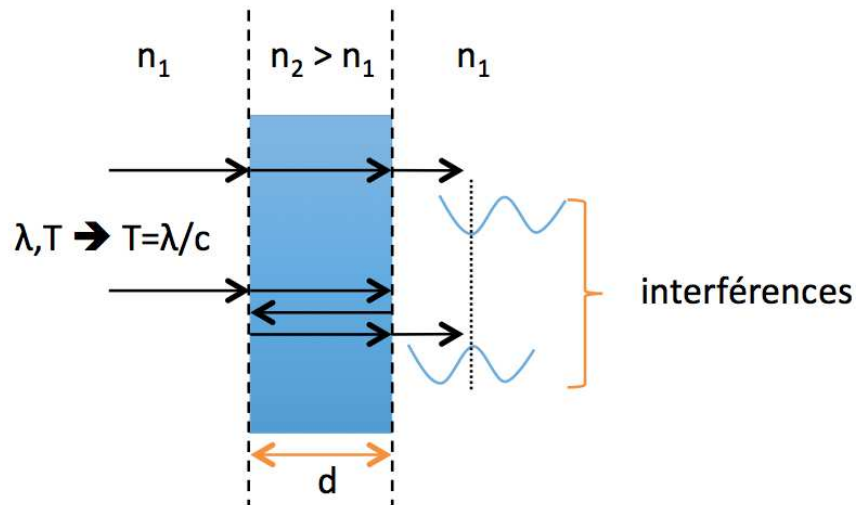


Figure 2.1 : Principe de base des interférences lumineuses

Considérons une couche mince d'épaisseur d d'un matériau d'indice de réfraction n_2 , entourée d'un autre matériau d'indice de réfraction n_1 , tel que $n_2 > n_1$, comme illustré sur la figure 2.1 ci-dessus. Considérons une onde monochromatique de longueur d'onde λ et de période T définie par :

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (2.1)$$

Où c représente la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$). D'après les coefficients de Fresnel, une partie de l'énergie lumineuse va traverser la couche mince. Une autre partie de l'énergie lumineuse va subir deux réflexions à l'intérieur de la couche mince avant de la traverser. On obtient deux ondes retardées l'une par rapport à l'autre d'un retard τ égale à la distance supplémentaire engendrée par la double réflexion ($2 \cdot d$), divisé par la vitesse de l'onde v dans le milieu d'indice n_2 , soit :

$$\tau = \frac{2 \cdot d}{v} = \frac{2 \cdot d}{c/n_2} \quad (2.2)$$

Puisque les deux ondes décrites précédemment sont issues de la même source lumineuse, elles sont cohérentes et vont pouvoir interférer.

Dans le cas où :

$$d = \frac{\lambda}{4 \cdot n_2} \quad (2.3)$$

En combinant les équations (2.1), (2.2) et (2.3), on obtient $\tau = T/2$. Le retard entre les deux ondes est précisément égal à une demi-période. Les ondes sont en opposition de phase (le maximum de l'une correspond au minimum de l'autre), cela forme des interférences destructives : la composante de longueur d'onde λ est atténuée en sortant de la couche mince d'indice de réfraction n_2 . On parle de lame quart-d'onde.

Cette fois-ci, dans le cas où :

$$d = \frac{\lambda}{2 \cdot n_2} \quad (2.4)$$

En combinant les équations (2.1), (2.2) et (2.4), on obtient cette fois-ci $\tau = T$. Le retard entre les deux ondes est précisément égal à une période. Les ondes sont en phase (le maximum de l'une correspond au maximum de l'autre), cela forme des interférences constructives : La composante de longueur d'onde λ n'est pas atténuée en sortant de la couche mince d'indice de réfraction n_2 . On parle de lame demi-onde.

Il existe deux principaux types de filtres basés sur les interférences lumineuses : les filtres de Fabry-Perot et les filtres interférentiels à couches minces.

2.1.1 Filtres de Fabry-Perot

Dans sa version la plus simple, un filtre de Fabry-Perot consiste en une couche mince de matériau diélectrique d'épaisseur d et d'indice n (appelé *spacer*) entourée de deux couches d'un matériau hautement réfléchissant (généralement un métal), le tout sur un substrat transparent, comme décrit sur la figure 2.2a. Cet empilement de trois couches constitue une cavité de Fabry-Perot [15], [16].

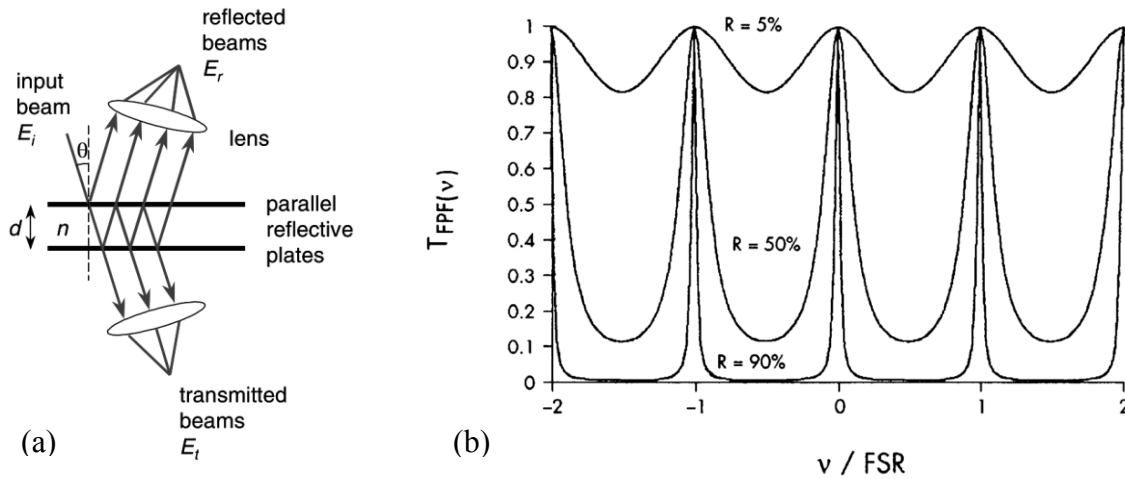


Figure 2.2 : (a) Principe de fonctionnement d'un filtre de Fabry-Perot [15]. (b) Réponse spectrale normalisée d'un filtre de Fabry-Pérot [15].

Un rayon lumineux qui rentre dans la cavité va subir de multiples réflexions entre les deux couches réfléchissantes. Cependant, à chaque fois que le rayon frappe la surface réfléchissante, une petite partie de la puissance lumineuse sort de la cavité, puisque le coefficient de réflexion R de la surface réfléchissante n'est pas rigoureusement égal à 1. Tous ces rayons sortants sont parallèles entre eux si les deux surfaces réfléchissantes sont parallèles entre elles. De plus, chaque nouveau rayon sortant de longueur d'onde λ possède une différence de phase ϕ identique par rapport au précédent, et de ce fait, dans le cas précis où $d = \lambda/2n$, cette différence de phase ϕ est égale à 2π (modulo 2π), et il y aura génération d'interférences constructives, d'après l'équation (2.4). Ainsi, seuls les rayons de longueur d'onde λ (ou multiple de λ) auront une amplitude maximale en sortie d'un filtre de Fabry-Perot, comme indiqué sur la figure 2.2b.

Plusieurs paramètres permettent de modifier la réponse spectrale d'un filtre de Fabry-Perot. Le fait d'augmenter la réflectivité de la surface réfléchissante permet d'obtenir une réponse

encore plus sélective : les pics de transmittance seront davantage prononcés, comme illustré sur la figure 2.2b. Afin d'augmenter la réflectivité de la surface réfléchissante, il est possible de remplacer cette dernière par une structure de Bragg, permettant d'obtenir un coefficient de réflexion R supérieur à 99 % (pour la longueur d'onde à transmettre), comme proposé par exemple par Irmer *et al.* en 2003 [17].

Il est également possible de changer l'épaisseur d du *spacer* afin de modifier la longueur d'onde à transmettre. Certains filtres plus évolués permettent de moduler en temps réel cette épaisseur en remplaçant le *spacer* par un gap d'air et en appliquant une tension aux extrémités de ce dernier : l'épaisseur du gap d'air dépend de la tension appliquée. Cette technique a été proposée par Spisser *et al.* en 1998 [18].

Enfin, il est possible de jouer sur l'indice de réfraction n en modifiant le matériau du *spacer* pour également faire varier la longueur d'onde à transmettre. Bhattacharya *et al.* [19] proposent des filtres de Fabry-Perot dont le *spacer* est constitué de matériaux variés tels que le MgF_2 , le NaAlF_6 ou encore le PbF_2 pour obtenir différents indices de réfraction n . Ces différents filtres possèdent des pics de transmission dans l'ultraviolet, de 200 à 340 nm [19].

Pour rappel, ce projet consiste à supprimer les composantes bleues et IR d'un éclairage LED. Il requiert donc un filtre avec une transmittance élevée sur une large bande de fréquence, ce qui n'est pas le cas des filtres de Fabry-Perot, qui sont très sélectifs. Adaptés pour des applications monochromatiques (télécommunications, réseaux de transmission multi-longueur d'onde, mono-chromatisation etc.), ils ne semblent toutefois pas le candidat idéal pour ce projet.

2.1.2 Filtres interférentiels à couches minces

Un filtre interférentiel à couches minces est un empilement sur un substrat transparent de plusieurs couches d'épaisseur variée de deux matériaux d'indice de réfraction différent : un matériau à faible indice de réfraction n_1 et un matériau à fort indice de réfraction n_2 (cf. figure 2.3 ci-après). D'une manière générale, le matériau à faible indice est l'oxyde de silicium (SiO_x) et le matériau à fort indice est le dioxyde de titane (TiO_2). Le contraste d'indice d'une couche à l'autre va générer de multiples réflexions au sein d'une couche, qui vont conduire à

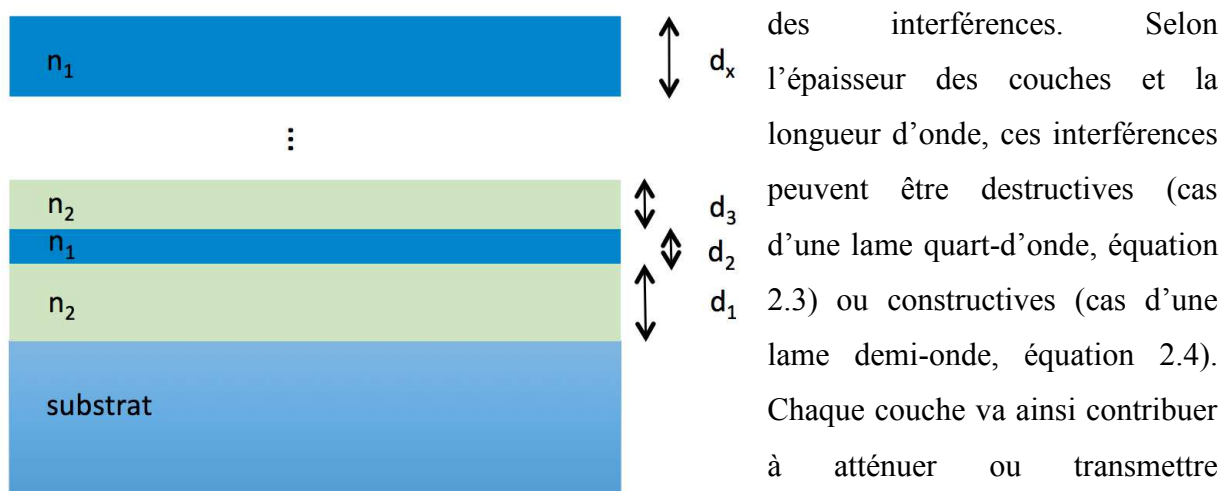


Figure 2.3 : Représentation schématique de la structure d'un filtre interférentiel à couches minces

filtres interférentiels permettent d'obtenir des réponses spectrales plus complexes et plus larges qu'un filtre de Fabry-Perot, au détriment toutefois d'une complexité de fabrication plus grande (nombre de couches élevé). Un grand contrôle de l'épaisseur d_x des couches, des propriétés optiques des matériaux (indice de réfraction n et coefficient d'extinction k) et de l'uniformité du dépôt sont nécessaires lors de la fabrication d'un filtre interférentiel à couches minces puisque ces paramètres vont définir les interférences qui conduisent à la réponse spectrale finale.

Un filtre interférentiel à couches minces pour l'éclairage LED a été développé par LEKLA Inc. dans le but de réduire les composantes bleues et infrarouges du spectre d'émission des LED blanches. Cette technologie est protégée par le brevet WO 2014/047724 A1 [6]. Composé d'une alternance de couches de SiO_x (faible indice de réfraction n_1) et TiO_2 (fort indice de réfraction n_2), il se décline en trois structures composées respectivement de 16, 22 et 28 couches. La structure la plus simple à 16 couches est représentée dans le tableau 2.1 ci-après :

numéro de couche	matériau	épaisseur d (nm)	indice de réfraction n à 550 nm
1	SiO _x	105,4	1,48
2	TiO ₂	170	2,35
3	SiO _x	32,4	1,48
4	TiO ₂	132,8	2,35
5	SiO _x	103,4	1,48
6	TiO ₂	126,3	2,35
7	SiO _x	53,1	1,48
8	TiO ₂	79,9	2,35
9	SiO _x	31,2	1,48
10	TiO ₂	49,6	2,35
11	SiO _x	62	1,48
12	TiO ₂	42,7	2,35
13	SiO _x	70,1	1,48
14	TiO ₂	204,3	2,35
15	SiO _x	179,2	1,48
16	TiO ₂	88,5	2,35

Tableau 2.1 : Détails d'une structure à 16 couches d'un filtre interférentiel à couche mince composé de SiO_x et TiO₂ [6]

Ce filtre est fabriqué en déposant alternativement du TiO₂ et du SiO_x par pulvérisation cathodique sur un substrat transparent. Le TiO₂ a été choisi par LEKLA pour son fort indice de réfraction, ce qui permet d'obtenir un contraste d'indice élevé entre le SiO_x et le TiO₂. La réponse spectrale du filtre requise pour cette application est complexe, puisqu'il s'agit d'atténuer les composantes bleues, rouges et proche-IR, tout en conservant une transmittance élevée dans le reste du spectre visible. C'est pour cette raison qu'un minimum de 16 couches est nécessaire. Les couches les plus minces, de 30 à 50 nm, selon leur épaisseur et leur indice de réfraction, vont générer des interférences destructives pour des longueurs d'onde comprises entre 200 et 450 nm (d'après l'équation 2.3, cas d'une lame quart-d'onde), contribuant à atténuer les ultraviolets et les bleus. Les couches en TiO₂ d'épaisseur intermédiaire, de 120 à 140 nm ainsi que les couches les plus épaisses de SiO_x vont générer des interférences constructives entre 500 et 630 nm (d'après l'équation 2.4, cas d'une lame demi-onde), contribuant à laisser passer les couleurs allant du vert jusqu'au rouge orangé. Davantage de détails sur ce filtre et le choix de cette solution peuvent être trouvés dans le brevet WO 2014/047724 A1 [6]. La réponse spectrale de ces trois filtres (respectivement 16, 22 et 28 couches) est détaillée dans la figure 2.4 (respectivement a, b et c) ci-après :

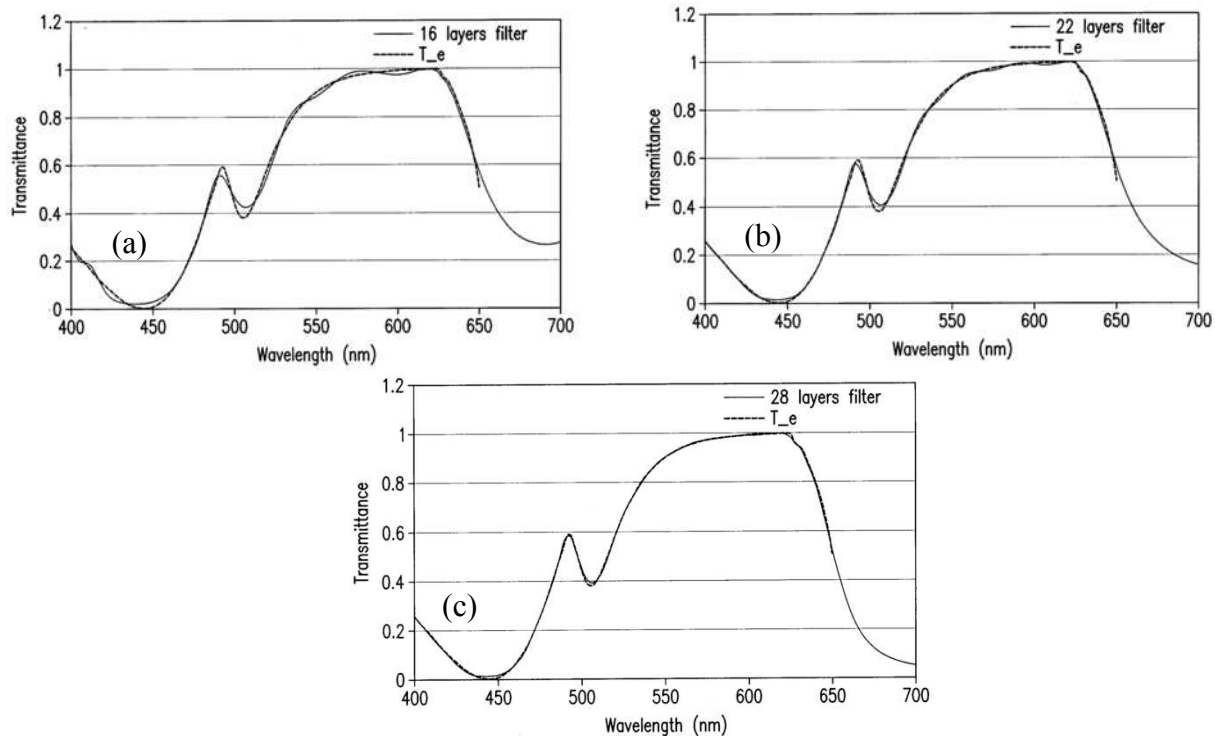


Figure 2.4 : Réponse spectrale d'un filtre interférentiel à couches minces de 16 couches (a), 22 couches (b) et 28 couches (c) pour des applications de filtrage de LED blanches, développés par LEKLA Inc. [6]

La réponse spectrale de chaque filtre (ligne continue) coïncide avec la réponse spectrale idéale (ligne pointillée nommée T_e dans la figure 2.4) pour une application de filtrage de LED blanches, dont les motivations ont été décrites dans le chapitre 1. Cette réponse idéale correspond à 1-MSAS, où MSAS est le *Melatonin Suppression Action Spectrum* illustré dans la figure 1.2, à laquelle a été ajoutée une décroissance rapide en transmittance des longueurs d'onde rouges et proches infrarouges, à partir de 630 nm. Il est important de remarquer que plus le nombre de couches est élevé, plus la réponse du filtre sera fidèle à la réponse visée. Un filtre avec un nombre de couches élevé sera toutefois plus complexe, long et coûteux à fabriquer. Cet aspect doit être pris en compte pour trouver le bon équilibre entre réponse spectrale acceptable et faible complexité de fabrication.

Il semblerait que les filtres interférentiels à couches minces soient mieux adaptés puisqu'ils permettent d'obtenir des réponses spectrales complexes, comme celles illustrées dans la figure 2.4, et qui répondent aux critères de filtration définis dans le chapitre 1.

2.2 Méthodes de dépôt pour la fabrication de filtres interférentiels

Si la pulvérisation cathodique et l'évaporation sont les techniques de dépôt les plus répandues pour la fabrication de filtres interférentiels (de Fabry-Perot ou à couches minces), il existe d'autres alternatives, dont le PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition).

2.2.1 Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique est la méthode PVD (Physical Vapor Deposition) la plus répandue [20]. Des ions argon (Ar^+) chargés positivement vont venir frapper une cible (constituée du matériau à déposer) et éjecter des atomes de cette cible. Les atomes éjectés vont être transportés dans le vide jusqu'au substrat situé à l'opposé de la cible. Ces atomes vont ensuite frapper le substrat et constituer la couche mince avec un taux de déposition de quelques nm/s. Pour le dépôt d'oxyde métallique (SiO_2 , TiO_2 , etc.), de l'oxygène est ajouté dans la chambre qui va réagir avec les atomes éjectés de la cible, constituée de métal (Si, Ti, etc.).

Tous les filtres décrits dans la section 2.1 ont été fabriqués par pulvérisation cathodique. Adaptée pour la fabrication de petits dispositifs pour des applications monochromatiques en télécommunication, par exemple, elle l'est beaucoup moins pour la fabrication de filtres destinés à l'éclairage qui nécessitent des réponses spectrales complexes. Cette technique est relativement coûteuse et possède un faible taux de déposition [21], la rendant peu compatible pour des dépôts épais (les filtres proposés par LEKLA Inc. et fabriqué par pulvérisation cathodique peuvent faire plusieurs μm d'épaisseur, en excluant le substrat). De plus, le procédé utilisé pour obtenir des oxydes métalliques parfaitement stœchiométriques (SiO_2 , TiO_2 , etc.) est compliqué à obtenir. Il peut causer des problèmes de qualité et robustesse des matériaux s'il n'est pas opéré correctement [22], [23]. Enfin, la pulvérisation cathodique n'offre que très peu de flexibilité pour modifier les propriétés optiques (indice de réfraction et coefficient d'extinction, n et k , respectivement) des matériaux déposés [24]. Puisque le design des filtres interférentiels fabriqués par pulvérisation cathodique impose un grand nombre de couches (entre 16 et 28) pour efficacement atténuer les longueurs d'onde souhaitées, la

reproductibilité de son procédé de fabrication à un niveau industriel peut être impactée. Il peut en effet être compliqué d'avoir un contrôle précis de l'épaisseur et des propriétés optiques de chacune des couches.

2.2.2 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

Contrairement à la pulvérisation cathodique, le PECVD est une technique CVD (Chemical Vapor Deposition), où les précurseurs utilisés pour déposer le matériau proviennent de sources gazeuses. Les précurseurs sont introduits dans le réacteur en phase gazeuse. Ils sont rendus réactifs (transformés en ions) à l'aide d'un plasma et diffusent en direction du substrat sous l'action d'un champ électrique. Ils vont réagir en surface pour former la couche mince. Le dépôt se fait à faible pression (quelques centaines de mtorr) pour réduire le libre parcours moyen des particules réactives et ainsi éviter des collisions génératrices de réactions parasites. Cela permet de s'assurer que la réaction n'ait lieu qu'en surface du substrat.

Le PECVD possède de nombreux avantages pour la réalisation de couches minces diélectriques :

- Tout d'abord, le PECVD est meilleur marché que la pulvérisation cathodique. Sous certaines conditions, le coût de fabrication d'un film par PECVD est jusqu'à trois fois moins cher au mètre carré qu'un film équivalent déposé par pulvérisation cathodique, selon une étude réalisée par D. Gard *et al.* en 2005 [21]. De plus, le taux de déposition plus élevé (jusqu'à 20 - 30 nm/s) de la technologie PECVD permet d'envisager une capacité de production annuelle plus importante, conduisant ainsi à un retour sur investissement plus rapide [21].
- Le PECVD est largement répandu dans l'industrie microélectronique pour effectuer des dépôts sur des surfaces importantes. C'est cette méthode qui est par exemple utilisée pour déposer le silicium microcristallin servant à la fabrication des TFT (Thin Film Transistors) que l'on trouve sur les écrans LCD (Liquid Crystal Display) [25]. Ces écrans peuvent faire plusieurs dizaines de pouces de diagonale. Il pourrait donc être envisagé de fabriquer le filtre sur une grande surface de matériaux transparents, puis de la découper aux dimensions des lampadaires.

- Les matériaux déposés par PECVD possèdent une meilleure qualité et une meilleure robustesse dans le temps. De ce fait, l'oxynitride de silicium (SiON) ou le nitrure de silicium (Si_3N_4) sont utilisés pour passiver (protéger) la plupart des composants microélectroniques, tels que les LED, les transistors, ou encore les cellules solaires photovoltaïques à la fin de leur procédé de microfabrication [26], [27].
- La technologie PECVD est compatible avec le procédé de microfabrication des LED. Un filtre interférentiel PECVD pourrait être utilisé comme couche de passivation, et donc intégrer au sein même du procédé de microfabrication des LED, en raison de la faible température impliquée (200 - 400 °C) qui respecte le budget thermique [20].
- Enfin, les propriétés optiques (n et k) des matériaux déposés par PECVD sont modifiables en faisant varier les paramètres de dépôts tels que le débit des gaz précurseurs, la puissance ou encore la pression. L'expertise acquise au 3IT sur la technologie PECVD a permis de développer du nitrure de silicium enrichi en silicium (Si-rich Si_xN_y) [28], [29], un matériau particulièrement adapté pour la photonique, avec un indice de réfraction élevé ($n > 2$ à 633 nm) et un faible coefficient d'extinction [28]. Ce matériau est entre autre utilisé pour la fabrication de guide d'onde dans le domaine du visible. Le ratio NH_3/SiH_4 , deux des précurseurs gazeux du nitrure de silicium, permet de varier l'indice de réfraction du Si-rich Si_xN_y de 1,85 à 2,25 : plus le débit de silane (SiH_4) sera élevé, plus l'indice de réfraction sera élevé [29]. Cette flexibilité permettrait de développer des matériaux conçus spécifiquement pour filtrer la lumière provenant d'un éclairage par LED, et donc potentiellement réduire le nombre de couche requis par le filtre.

Malgré les nombreux avantages de la technique PECVD (coût, qualité, contrôle des propriétés optiques, etc.), elle n'a à ce jour pas encore été employée pour la fabrication de filtres interférentiels à couche mince dans le domaine du visible, de 400 à 700 nm. La technique PECVD semblerait toutefois une solution pour la fabrication de filtres interférentiels à faible coût, puisqu'elle permettrait de simplifier la structure du filtre grâce au développement de matériaux innovants à fort indice de réfraction. Avec une structure simplifiée, la reproductibilité du procédé de fabrication de ces filtres pourrait également être améliorée. L'oxyde de silicium (SiO_x) sera utilisé comme matériau à faible indice, puisqu'il est également possible de le déposer par PECVD [30].

CHAPITRE 3.

CONCEPTION, FABRICATION ET CARACTERISATION D'UN FILTRE INTERFERENTIEL PECVD

Avant-propos

Auteurs et affiliations

Joffrey Belin : Etudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique

Abdelatif Jaouad : Professeur associé, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique

Etienne Grondin : Professionnel de recherche, coordonnateur technique du 3IT.nano, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique

Vincent Aimez : Professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie électrique et de génie informatique

Date de publication : à venir

Revue : Optics Express

Titre français : Fabrication de filtres interférentiels à faible coût destinés à l'éclairage LED et fabriqués par PECVD

Contribution au mémoire : Cet article traite des techniques utilisées pour la conception, la fabrication et la caractérisation de filtres interférentiels fabriqués par PECVD. Les résultats obtenus sont ensuite analysés

Résumé français : Dans cette étude, nous proposons une méthode pour fabriquer des filtres interférentiels en utilisant la technique de dépôt PECVD. Ces filtres sont conçus pour réduire

les longueurs d'ondes bleues, rouges et IR provenant d'un éclairage LED et qui ont des effets négatifs sur la santé et l'environnement. Nous avons développé un nitrure de silicium enrichi en silicium (Si-rich Si_xN_y) possédant un très fort indice de réfraction, un fort coefficient d'extinction dans le bleu et un très faible coefficient d'extinction dans le reste du spectre visible. Nous avons combiné ce Si-rich Si_xN_y avec de l'oxyde de silicium (SiO_x) pour fabriquer un filtre interférentiel destiné à l'éclairage LED. L'utilisation de ce matériau avec une absorbance sélective et un fort indice de réfraction a permis de simplifier le procédé de fabrication du filtre (6 couches seulement), sans impact sur la réponse spectrale. De plus, la réponse spectrale de ce filtre est uniforme et peu sensible aux variations d'angle d'incidence. Le fort coefficient d'extinction du Si-rich Si_xN_y dans les longueurs d'onde bleues a permis de réduire significativement le nombre de couches minces du filtre par comparaison aux technologies déjà commercialisées. Nous démontrons ici le fort potentiel de l'utilisation de la technique PECVD pour fabriquer des filtres interférentiels bon-marchés et reproductibles, qui pourraient être utilisés dans de nombreuses applications.

Note : Il se peut que la version de l'article insérée dans ce mémoire diffère légèrement de la version finale.

3.1 Fabrication of low-cost interference filters for LED lighting using PECVD

Abstract: We propose a method to fabricate interference filters using Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) to reduce blue, and near-infrared wavelengths that are inherent to LED lighting but that have a negative impact on human health and the environment respectively. We developed a Si-rich silicon nitride (Si-rich Si_xN_y) material, with a very high refractive index, a high extinction coefficient in the blue range and a very low extinction coefficient in the rest of the spectrum. We combined this Si-rich Si_xN_y with silicon oxide (SiO_x) to realize an LED interference filter. The use of a material with a selective absorbance and high refractive index allows for a simple fabrication process of a filter with only a six layers structure even for complex spectral response. Moreover, the filter response is uniform and tolerant to incidence angle variation. With this work, we demonstrate the high potential of

PECVD technique for the fabrication of low cost and reproducible interference filters that could be used in various applications.

Keywords

- Thin film devices and applications
- Thin film optical properties
- Multilayer design
- Deposition and fabrication
- Light-emitting diodes

3.1.1 Introduction

White Light-Emitting Diodes (LEDs) are becoming widely used for lighting purpose [1]–[3]. LEDs have much higher luminous efficiency ($> 100 \text{ lm/W}$) than incandescent or fluorescent technologies [3]. Moreover, recent progress in micro and nanotechnology have reduced the fabrication cost, from 12.5 \$/klm in 2011 to 2.3 \$/klm in 2015 [3], making LEDs more affordable with a faster return on investment, in addition to a better reliability and longer lifetime (100 times longer than incandescent technology and 10 times longer than fluorescent technology) [2].

Aware of the significant savings they can attain, communities and private companies have started using white LEDs for both outdoor and indoor public lighting (e.g. roads, streets, warehouses, malls, etc.). However, the white LED emission spectrum differs from the incandescent light emission spectrum, with much higher emission in the blue range, around 450 nm [1]. It has been demonstrated that such blue wavelengths reduce the secretion of melatonin (figure 1a), a hormone secreted by the human body [4]–[6]. This hormone has beneficial properties (anticarcinogen, anti-oxidant, etc.) [9], [10], and also regulates the circadian cycle (biological clock) in humans [4]–[6], [9], [10]. The lack of melatonin can induce insomnia, stress, nervousness, or even depression in the worst case [4]–[6]. Removing blue wavelengths would also reduce light pollution, an important issue for some major cities [12].

It has also been demonstrated that red and near-infrared (IR) wavelengths from both LED and incandescent lighting perturb the biological cycle of vegetation. Indeed, chlorophyll has an

absorption peak between 650 nm and 710 nm (depending on the kind of chlorophyll) that sets up the photosynthesis reaction, which must not be activated at night [7]. This red and near-infrared light also increases insect mortality because their predators are attracted by this artificial light at night time [8].

LED interference filters (LED I-Fs) have been proposed [6] in order to reduce the blue, red and IR (beyond 630 nm) components of the spectrum, without impacting the lighting quality for safety and comfort [6]. The ideal spectral response of said filters approaches a transmittance equal to 1-MSAS, whereas MSAS is the *Melatonin Suppression Action Spectrum* [4] (figure 3.1a), added to a rapid decrease in the red / infrared range starting at 630 nm (shown as 'targeted spectrum' in figure 3.1b).

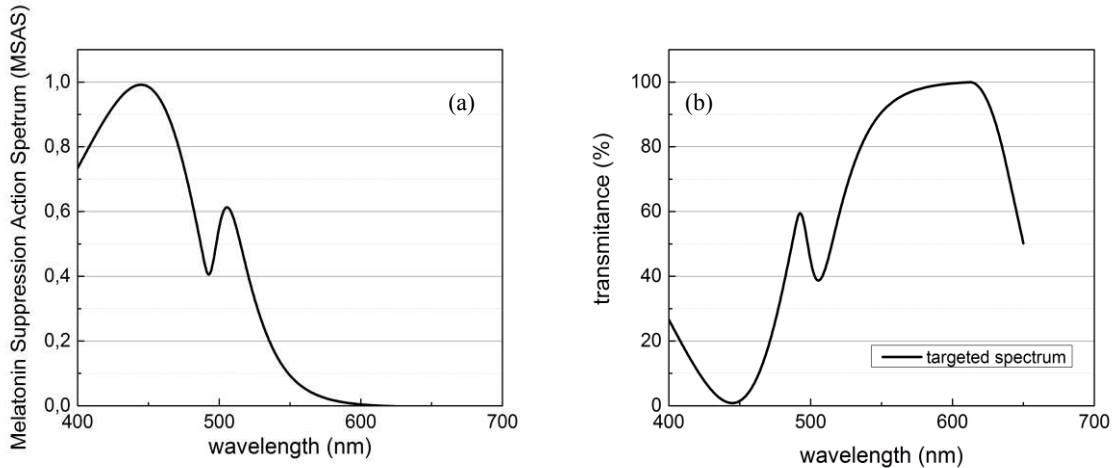


Figure 3.1 : (a) Melatonin Suppression Action Spectrum [4]. High values correspond to a reduction of the melatonin secretion. (b) Ideal spectral response of a LED I-F to correctly attenuate blue, red and IR wavelengths without impacting the rest of the visible spectrum.

The proposed LED I-Fs were previously designed using the optical parameters (refractive index and absorption coefficient) of sputtered titanium dioxide (TiO_2) and silicon dioxide (SiO_2) as high refractive index material (HRI), and low refractive index material (LRI) respectively [6]. Using these two materials, a stack of 16 to 28 layers was required to obtain a spectral response satisfyingly close to the targeted spectrum represented in figure 3.1b. However, such a high number of layers is difficult to achieve with good control over a large surface. Furthermore, sputtering of dielectric transparent materials is relatively expensive and has a low deposition rate [21] (sputtered LED I-Fs can be several μm thick) and is thus inappropriate for this low cost application.

As an alternative, in this work we propose the fabrication of LED I-Fs using Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD), which is known for its low cost and its high deposition rate [21]. This technique is adapted and widely used for large surface area depositions (e.g. LCD TV fabrication) [25]. PECVD materials have proven to be robust, keeping their good quality over time as they are used to passivate most of electronic devices including LEDs, transistors, solar cells, etc. [26], [27]. Even if PECVD has not been used for interference filter realization, the fact that the optical properties of the deposited materials (n and k) can be widely modified and controlled by changing the plasma process parameters (e.g. gas flow, pressure, power, etc.) [28], [29], makes it potentially suitable for this kind of applications. In this work we demonstrate that this flexibility allows to reduce the number of layers required to achieve the targeted spectral filtering, thus reducing the fabrication cost and its sensitivity to deposition process fluctuations.

3.1.2 Optimization of optical properties of PECVD materials

Multiple published works have shown a strong correlation between the optical properties of PECVD materials and the deposition plasma conditions (e.g. pressure, frequency, gas flows, etc.) [28], [29]. Silicon nitride (Si_xN_y) with high refractive index and very low extinction coefficient ($n = 2.0\text{--}2.1$ at 633 nm) has been developed for optical applications purpose [28], [31]. Different LED I-Fs structures were simulated using this low-absorption PECVD Si_xN_y as the HRI material in combination with PECVD silicon oxide as the LRI material. To obtain a good fit with the targeted spectrum (figure 3.1b), a minimum of 20 layers is required. Even though the $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_x$ LED I-F designed with this low-absorption Si_xN_y can benefit from the PECVD advantages, the number of layers remains as challenging as for sputtered $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ filters and needs to be reduced to reach industrial compatibility in terms of cost, robustness and ease of fabrication.

To lower the number of layers, we propose the use of a silicon nitride material with a high refractive index and a high extinction coefficient in the blue spectral region, with very low absorption in the visible and IR part of the spectrum. The filtering of the blue wavelengths being achieved by absorption instead of interference, the filter structure simplifies. Silicon-rich silicon nitride (Si-rich Si_xN_y) seems to be a material of choice for this purpose since its

refractive index can be varied over a wide range, from 2.0 to 2.7 (at 450 nm), and its extinction coefficients adjusted from 10^{-8} to 10^{-2} [29].

For this study, we have limited our investigation to high n and high k values. We developed 3 different Si-rich Si_xN_y material compositions (A, B and C) using a parallel plate PECVD system with a 13.56 MHz high frequency power supply. The pressure was maintained at 300 mTorr, and the temperature fixed at 300 °C. The flow rates of the process gases are given in table 3.1. Optical properties of the PECVD thin films were measured using a spectroscopic ellipsometer (figure 3.2). As expected from previous work, both n and k increases when the ratio silane/ammonia increases. The extinction coefficient of all 3 Si-rich Si_xN_y is high in the blue range, and becomes negligible beyond 550, 580 and 610 nm for A, B and C respectively (figure 3.2b).

Material	gas flow rates (sccm)				optical properties	
	nitrogen	silane	ammonia	nitrous oxide	n at 633 nm	k at 382 nm
SiO_x	392	10	0	1420	1.47	0
Si-rich Si_xN_y -A	2060	50	10	0	2.34	0.24
Si-rich Si_xN_y -B	2060	52	8	0	2.41	0.32
Si-rich Si_xN_y -C	2060	55	5	0	2.61	0.49

Table 3.1 : Gas flow rates and optical properties of SiO_x and Si-rich Si_xN_y

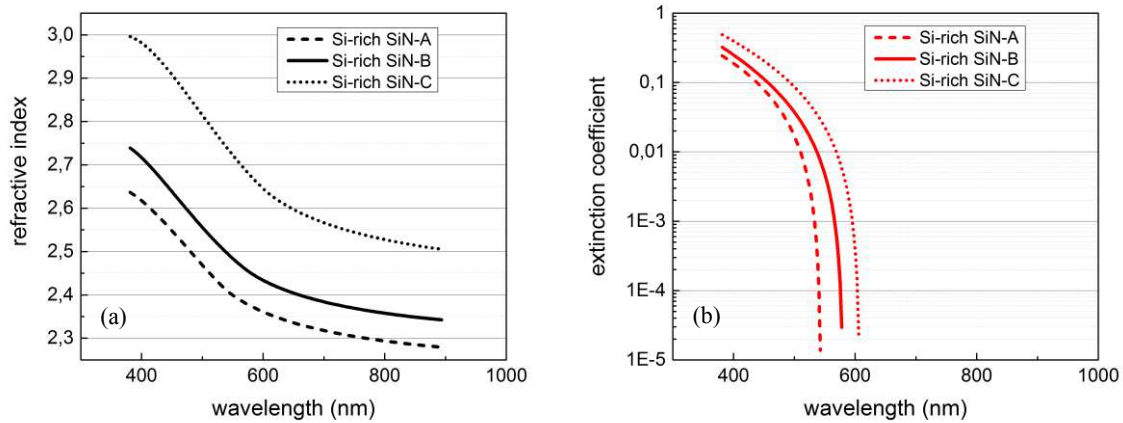


Figure 3.2 : Refractive index (a) and extinction coefficient (b) of Si-rich Si_xN_y for different ratios of silane/ammonia. Both refractive index and extinction coefficient increase when this ratio increases.

Calculation runs were performed, using the transfer matrix method, to design LED I-Fs using Si-rich Si_xN_y (A, B and C)/ SiO_x materials. From optimization of the total number of PECVD layers necessary to obtain the targeted filter response, it appears that it is possible to obtain an acceptable result with a structure having a minimum of 6 layers (3 layers of Si-rich Si_xN_y and 3 layers of SiO_x). The thickness of the different layers is optimized to best fit the targeted spectrum at 0° incidence angle. Figure 3.3a, b and c represent the optimal calculated spectral response of the 6-layers LED I-Fs when the Si-rich Si_xN_y material A, B and C is used as the HRI respectively.

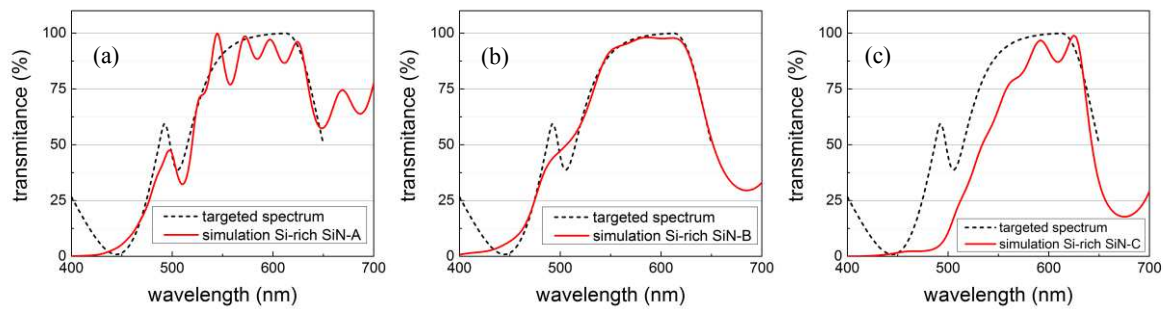


Figure 3.3 : Simulation of the spectral response of a 6-layer structure PECVD LED I-F. Si-rich Si_xN_y -A, B and C is used as the HRI material in figure (a), (b) and (c) respectively. PECVD SiO_x is used as the LRI material for all 3 figures. All simulated structures were designed to fit the targeted spectrum at 0° incidence angle.

As we can see from figure 3.3a, when the Si-rich Si_xN_y -A is used as the HRI material, blue wavelengths are sufficiently absorbed but, because of the layer thicknesses required to achieve this absorption, ripples from 550 to 700 nm degrade the spectral response. In the other hand, from figure 3.3c we see that with the use of the Si-rich Si_xN_y -C, the extinction coefficient is too high and wavelengths in the green-yellow range are also overly absorbed. Si-rich Si_xN_y -B seems to be the best compromise (figure 3.3b). Its refractive index is high enough to be used as the HRI, and its extinction coefficient leads to proper absorption of the blue wavelengths without affecting the rest of the visible spectrum. These calculations are showing that optimized Si-rich Si_xN_y / SiO_x deposited by PECVD could be used to fabricate filters with a lower number of layers (6 layers) relative to TiO_2 / SiO_2 sputtered filters, where a minimum of 16 layers is required to obtain a comparable spectral response.

3.1.3 Uniformity of the PECVD SiO_x and Si-rich Si_xN_y thin films

To make the PECVD LED I-F compatible with the application requirements, the deposition process must be uniform over large areas. The process also has to give a good repeatability over the the deposition rates and the optical properties to deliver the same spectral response over the whole LED I-F surface, and ensure a uniform coloration of the out coming light. SiO_x and Si-rich Si_xN_y -B were deposited onto 100mm Si wafers in order to evaluate this uniformity. The measured relative thickness standard deviation was 0.31 % for the SiO_x thin film and 5.62 % for the Si-rich Si_xN_y -B thin film. The refractive index and extinction coefficient have shown a good uniformity for both Si-rich Si_xN_y and SiO_x . The simulated impact of this non-uniform thickness on the spectral response is shown in figure 3.4. As expected, the small variation of silicon oxide has almost no impact on the spectral response of the filter (figure 3.4a), indicating that the developed process is sufficiently uniform for this application. In contrast, the non-uniformity of the Si-rich Si_xN_y -B layers has a drastic impact on the spectral response, according to figure 3.4b, which is not acceptable for a reproducible fabrication process.

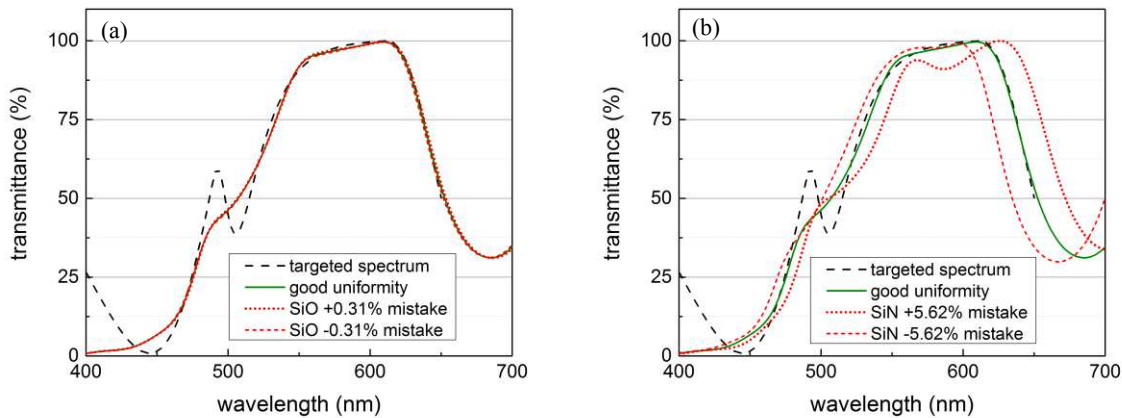


Figure 2.4 : (a) Impact of a $\pm 0.31\%$ thickness error on the SiO_x layers on the spectral response. (b) Impact of a $\pm 5.62\%$ thickness error on the Si-rich Si_xN_y -B layers on the spectral response.

In order to improve the uniformity of the Si-rich Si_xN_y -B thin film, we investigated the effect of the pressure and the temperature during the plasma deposition process. Using the same silane/ammonia gas ratio as previously (52/8 sccm), we varied the pressure from 300 mTorr to 900 mTorr and the deposition temperature was 300 °C and 350 °C respectively. Figure 3.5a

shows the relative standard deviation of the Si-rich $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-B}$ thin film thickness with respect to the pressure.

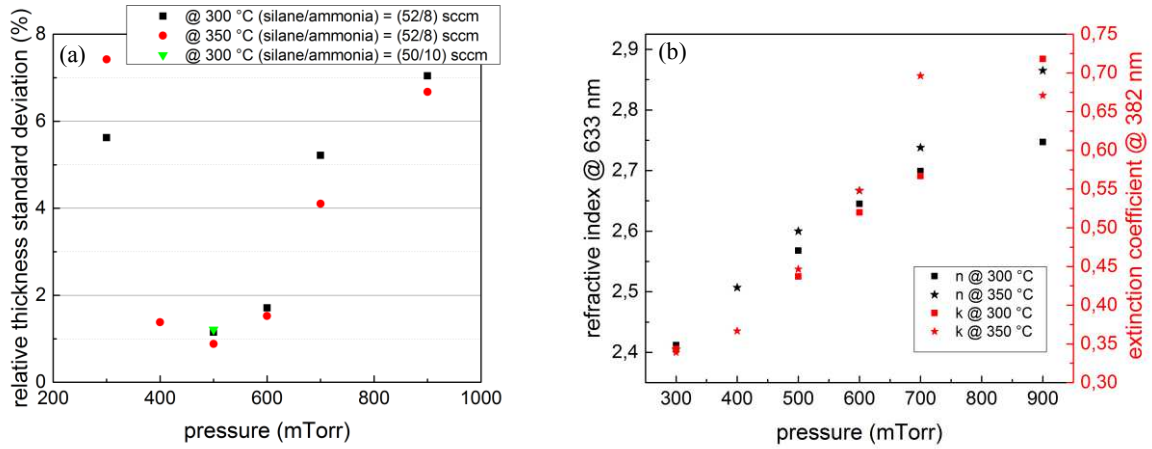


Figure 3.5 : (a) Relative thickness standard deviation of the Si-rich $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-B}$ thin film with respect to the deposition pressure at 300 °C and 350 °C. (b) Optical properties of the Si-rich $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-B}$ thin film with respect to the deposition pressure at 300 °C and 350 °C.

The best uniformity was found at 500 mTorr, at either 300 °C or 350 °C. With these parameters, the thickness standard deviation is 1 %, which will have a much smaller impact on the spectral response. However, changing the pressure also changes the optical properties of the thin film, even though the ratio of silane/ammonia was kept at 52/8 sccm, as illustrated on figure 3.5b. Both refractive index and extinction coefficient increase when the pressure increases. At an operation point of 500 mTorr (instead of 300 mTorr initially), the optical properties are comparable to those of the Si-rich $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-C}$ ($n = 2.85$ and $k = 0.17$), and an acceptable spectral response cannot be obtained from this material, as demonstrated previously. To compensate this increase in absorption, the ratio of silane/ammonia was reduced from 52/8 sccm to 50/10 sccm in order to reduce both the refractive index and the extinction coefficient. This lower ratio produced a material with optimal optical properties, similar to those of the Si-rich $\text{Si}_x\text{N}_y\text{-B}$ ($n = 2.67$ and $k = 0.12$), with a very good uniformity (1 %). This new process operating point was then used to deposit the HRI material and to fabricate a 6-layer PECVD LED I-F. It was deposited at 300 °C to fit with the deposition temperature of the SiO_x .

3.1.4 Results and discussions

3.1.4.1 Structure and spectral response of the 6-layer PECVD LED I-F

Using the last PECVD process parameters, we fabricated the 6-layers PECVD LED I-F by alternatively depositing 3 layers of Si-rich Si_xN_y and 3 layers of SiO_x onto a 100-mm quartz wafer. Each layer has been characterized by ellipsometry, and the refractive index and thickness of each layer is given in table 2. It is given as an example since several structures are possible to fit with the targeted spectrum.

	material	refractive index	thickness
layer 6	SiO_x (LRI)	1.47	273.1 nm
layer 5	Si-rich Si_xN_y (HRI)	2.39	340.6 nm
layer 4	SiO_x (LRI)	1.47	544.5 nm
layer 3	Si-rich Si_xN_y (HRI)	2.39	103.3 nm
layer 2	SiO_x (LRI)	1.47	94.0 nm
layer 1	Si-rich Si_xN_y (HRI)	2.39	117.5 nm
substrate	Quartz	1.46	500 μm

Table 3.2 : Detailed structure of a 6-layer PECVD LED I-F

The spectral response of this 6-layer PECVD LED I-F has been measured using a spectrophotometer at 0° incidence angle. The result is illustrated in figure 3.6a. The measured spectral response in transmittance (red straight line) fits closely with the targeted spectrum, with the highest of the deviation in the 400-430 nm range, which is still acceptable since white LEDs do not emit significantly in this range [1]. The small deviation (less than $\pm 10\%$) observed in the 500 nm region is not problematic either and falls within the tolerance criteria required for this application [6].

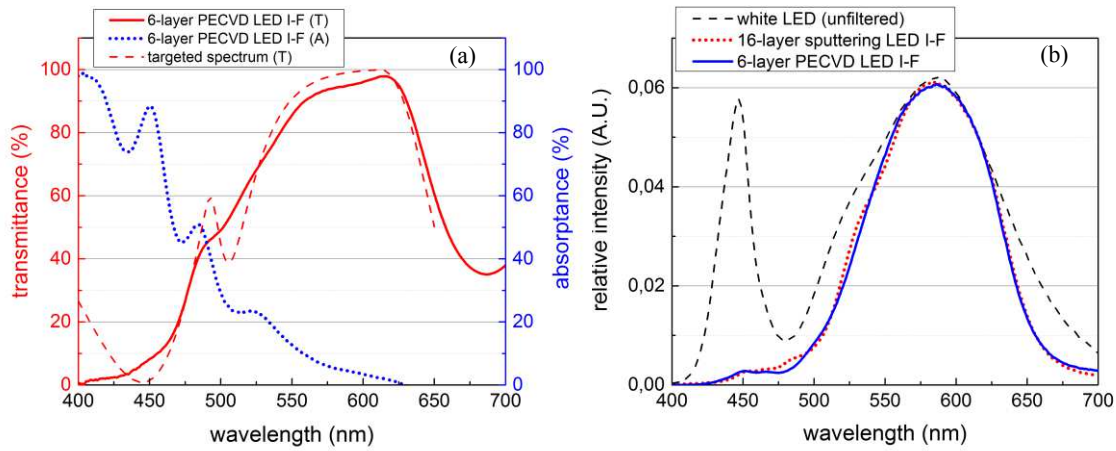


Figure 3.6 : (a) Spectral response of the 6-layer PECVD I-F measured with a spectrophotometer at 0° incidence angle. (b) Simulation of the emission spectrum of a white LED through the 6-layer PECVD LED I-F and through the 16-layer sputtering LED I-F.

The transmitted light spectrum of a white LED passing through the realized PECVD filter was calculated, and is represented in figure 3.6b by the blue straight line. The white LED emission spectrum used was that of a standard Philips model *SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5* (black dashed line) at an electrical power consumption of 105 W and a luminous efficiency of 116 lm/W [32]. This brand and model will be used as a reference source for this study as it is widely used in streetlamps. As we can observe from figure 3.6b, the transmitted spectrum through the 6-layers PECVD filter is very similar to what would be obtained from a 16-layers sputtered TiO₂/SiO₂ filter (red dotted line) [6]. The measured absorption spectrum of the PECVD filter (figure 3.6a, blue dotted line) confirms that wavelengths from 400 to 500 nm are not attenuated by destructive interferences, but mainly by optical absorption inherent to the high extinction coefficient of the Si-rich Si_xN_y in this range. The absorption in the visible range could be attributed to the presence of Si-Si bonds (which replace some of the Si-N bonds) in the Si-rich Si_xN_y thin films [33], or to Si nanocrystals (nc-Si) embedded in the silicon nitride matrix [34].

3.1.4.2 Influence of the incidence angle on the spectral response

Public lighting often requires a wide cone of emission from a white LED to illuminate a large area (e.g. streetlamps). A typical streetlamp white LED emits its light inside a cone with an angle of 70° (with respect to the normal incidence) [32]. It is very important that the spectral

response of a LED I-F remains constant over such a wide range of incidence angles to ensure consistent filtering of the blue, red and near-IR wavelengths. We simulated the transmitted spectrum of a white LED through the fabricated PECVD filter for different incidence angles, from 0° to 80° (represented in figure 3.7a), and compared it to the transmission through the sputtered $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 16-layers filter (figure 3.7b). For a better interpretation of the simulation, we calculated the mean squared errors (MSE) of each spectral response with respect to the targeted spectrum, and represented them in figure 3.7c for the same range of incidence angles.

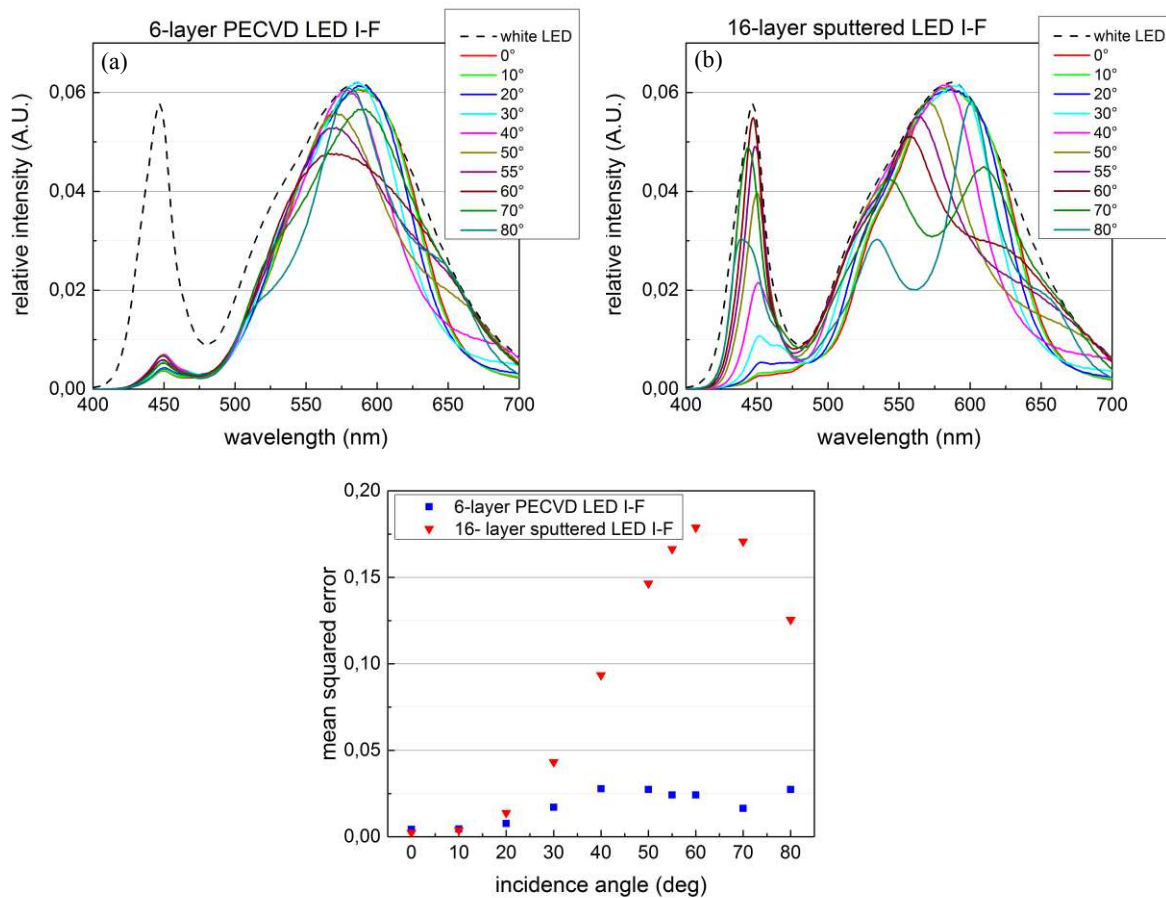


Figure 3.7 : Emission spectra of the Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5 white LED through the 6-layer PECVD LED I-F (a) and through the 16-layer sputtering LED I-F (b) for different incidence angles. (c) Mean squared errors with respect for the targeted spectrum of each spectral response, at different incidence angles.

This simulation demonstrates that the transmitted spectrum is less sensitive to the incidence angle variation when the PECVD filter is applied to the white LED source. We attribute this good angular robustness to the high extinction coefficient of the Si-rich Si_xN_y in the blue range. The 450 nm emission peak is attenuated by optical absorption regardless of the

incidence angle. We also attribute this good angular robustness to the simplified structure of the PECVD filter, which is less dependent on interference, making its spectral response less sensitive to the optical path variation inherent with the incidence angle range.

3.1.4.3 Influence of the incidence angle on the ground spotlight colors

For LED streetlamps using I-Fs, the angular dependence of the transmitted spectra could induce a significant impact on the color of projected light to the ground, which can be an issue for the user in terms of comfort and safety. In order to evaluate this dependency, we simulated the light color on a CCT scale (Correlated Color Temperature) with respect to the incidence angle, for both LED I-Fs types. The transmitted spectra shown on figure 3.7 were used for this calculation.

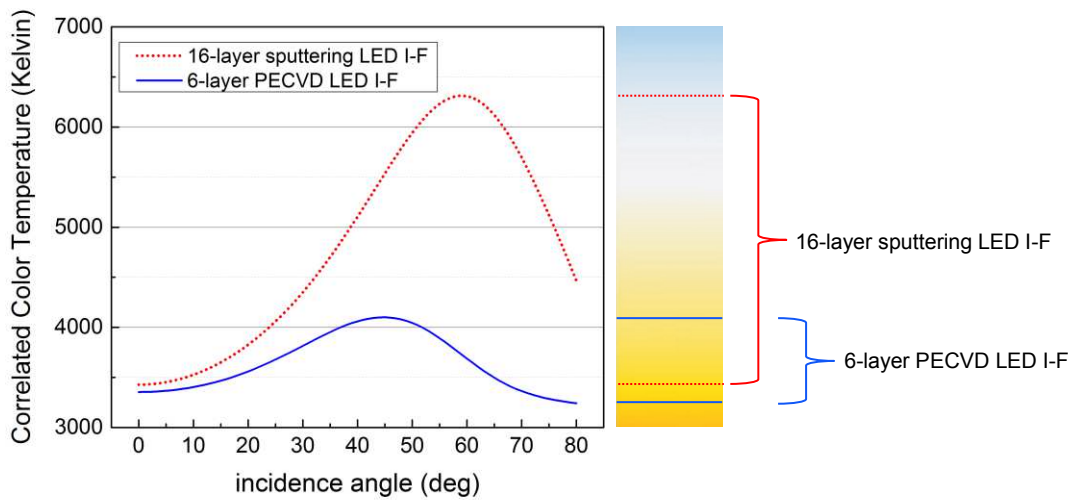


Figure 3.8 : Correlated Color Temperature (CCT) in Kelvin of a white LED through the 6-layer PECVD LED I-F and through the 16-layer sputtering LED I-F, with respect to the incidence angle.

As shown in figure 3.8, the temperature of the light transmitted through the 6-layer PECVD filter (blue straight line) remains inside a very small range, from 3200 to 4100 K, corresponding to a pale yellowish color. This small range of temperature is almost imperceptible to a human eye, and the light color will appear almost uniform. In contrast, the temperature range (3400-6300K) is much higher for the 16-layer sputtered filter (red dotted line), and the corresponding transmitted light contains a high level of blue around 60° incidence angles. The good color uniformity of the PECVD filter is directly related to its good angular robustness.

3.1.5 Conclusion

An interference/absorbance filter has been fabricated using PECVD to produce a simple $\text{Si}_x\text{N}_y/\text{SiO}_x$ structure composed of only 6 thin layers, whereas an equivalent filter fabricated by sputtering of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ would require at least 16 thin layers. This simplification is mainly due to the development of Si-rich Si_xN_y material with a very high refractive index, a high extinction coefficient in the blue range and a very low absorption in rest of the visible spectrum. This PECVD filter fulfills the requirements to attenuate the wavelengths that have a negative impact on the human health and the environment, without compromising the quality of the lighting. In comparison to the 16-layers sputtered filter, the 6-layers PECVD filter is less sensitive to the incidence angle variation, which further increases its high potential for public lighting. The advantages in terms of simplicity and angular robustness of the PECVD filter are attributed to the fact that an important part of the filtration is done by optical absorption through the Si-rich Si_xN_y thin films, rather than only by optical interference. This PECVD filter could be directly deposited on the streetlamp glass, or integrated as a final step in a full LED microfabrication process.

3.1.6 Acknowledgments

The authors thank LEKLA Inc., headquartered in the city of Sherbrooke, Québec, Canada, and “Ministère de l’Economie, Science et Innovation du Québec” for their support through “Passport Innovation Program”.

3.2 Conclusion

Le tableau 3.3 ci-après résume et compare le filtre interférentiel fabriqué par PECVD et proposé dans ce chapitre 3, au filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation cathodique et développé par LEKLA Inc.

	Filtre proposé au cours de ce projet	Filtre proposé par LEKLA Inc.																																																																								
Méthode de dépôt	PECVD	Pulvérisation cathodique																																																																								
Structure	Simple (6 couches) <table> <tr> <th>Matériau</th><th>Indice de réfraction</th><th>Epaisseur (nm)</th></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>273,1</td></tr> <tr> <td>Si-Rich SiN</td><td>2,39</td><td>340,6</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>544,5</td></tr> <tr> <td>Si-Rich SiN</td><td>2,39</td><td>103,3</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>94</td></tr> <tr> <td>Si-Rich SiN</td><td>2,39</td><td>117,5</td></tr> </table>	Matériau	Indice de réfraction	Epaisseur (nm)	SiOx	1,47	273,1	Si-Rich SiN	2,39	340,6	SiOx	1,47	544,5	Si-Rich SiN	2,39	103,3	SiOx	1,47	94	Si-Rich SiN	2,39	117,5	Complexe (16 couches) <table> <tr> <th>Matériau</th><th>Indice de réfraction</th><th>Epaisseur (nm)</th></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>105,4</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>170</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>32,4</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>132,8</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>103,4</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>126,3</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>53,1</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>79,9</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>31,2</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>49,6</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>62</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>42,7</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>70,1</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>204,3</td></tr> <tr> <td>SiOx</td><td>1,47</td><td>179,2</td></tr> <tr> <td>TiO2</td><td>2,28</td><td>88,5</td></tr> </table>	Matériau	Indice de réfraction	Epaisseur (nm)	SiOx	1,47	105,4	TiO2	2,28	170	SiOx	1,47	32,4	TiO2	2,28	132,8	SiOx	1,47	103,4	TiO2	2,28	126,3	SiOx	1,47	53,1	TiO2	2,28	79,9	SiOx	1,47	31,2	TiO2	2,28	49,6	SiOx	1,47	62	TiO2	2,28	42,7	SiOx	1,47	70,1	TiO2	2,28	204,3	SiOx	1,47	179,2	TiO2	2,28	88,5
Matériau	Indice de réfraction	Epaisseur (nm)																																																																								
SiOx	1,47	273,1																																																																								
Si-Rich SiN	2,39	340,6																																																																								
SiOx	1,47	544,5																																																																								
Si-Rich SiN	2,39	103,3																																																																								
SiOx	1,47	94																																																																								
Si-Rich SiN	2,39	117,5																																																																								
Matériau	Indice de réfraction	Epaisseur (nm)																																																																								
SiOx	1,47	105,4																																																																								
TiO2	2,28	170																																																																								
SiOx	1,47	32,4																																																																								
TiO2	2,28	132,8																																																																								
SiOx	1,47	103,4																																																																								
TiO2	2,28	126,3																																																																								
SiOx	1,47	53,1																																																																								
TiO2	2,28	79,9																																																																								
SiOx	1,47	31,2																																																																								
TiO2	2,28	49,6																																																																								
SiOx	1,47	62																																																																								
TiO2	2,28	42,7																																																																								
SiOx	1,47	70,1																																																																								
TiO2	2,28	204,3																																																																								
SiOx	1,47	179,2																																																																								
TiO2	2,28	88,5																																																																								
Influence de l'angle d'incidence sur la réponse spectrale	modérée	importante																																																																								
Influence de l'angle d'incidence sur le rendu colorimétrique	modérée	importante																																																																								
Coût	modéré	important																																																																								

Tableau 3.3 : Résumé et comparaison des deux technologies de filtres interférentiels

CHAPITRE 4.

METHODES DE FABRICATION DU FILTRE INTERFERENTIEL

L'objectif de ce chapitre est de donner quelques aspects pratiques sur la conception, fabrication et caractérisation d'un filtre interférentiel fabriqué par PECVD. Ces aspects n'apparaissent pas dans le chapitre 3 car ils ne sont pas forcément nécessaires à compréhension de l'article scientifique, mais permettraient à une personne chargée de poursuivre le projet d'être plus efficace dans la réalisation d'un tel filtre.

4.1 Simulations de filtres interférentiels avec Essential Macleod

Tous nos travaux de simulations ont été réalisés à l'aide du logiciel Essential Macleod. Il permet de simuler une structure composée d'un substrat et d'une ou plusieurs couches minces, et d'en extraire la réponse spectrale (transmittance, réflectance, etc.). Cette réponse spectrale est calculée à partir des caractéristiques de la couche mince, à savoir son épaisseur et ses propriétés optiques

Les propriétés optiques de la couche mince sont enregistrées sous la forme d'un fichier matériaux, dont l'indice de réfraction et le coefficient d'extinction sont donnés en fonction de la longueur d'onde. Il nous est donc possible de créer nos propres fichiers matériaux, à partir des données provenant de l'ellipsomètre. Nous avons donc pu simuler des structures de filtres interférentiels avec tous les différents nitrures de silicium et oxydes de silicium développés au cours de ce projet.

Enfin, ce logiciel permet à partir d'un spectre souhaité (« *targeted spectrum* »), de déterminer une structure de couches minces dont la réponse spectrale se rapproche le plus de ce spectre souhaité. Le logiciel va prendre en compte plusieurs paramètres, tels que le choix des matériaux, le nombre de couches minces (nombre imposé ou non), etc. C'est de cette manière que nous avons réussi à optimiser la structure de notre filtre interférentiel

4.2 Influence du substrat sur la vitesse de déposition

Lors de la fabrication des différents prototypes de filtre interférentiel, nous nous sommes aperçus que l'épaisseur de la première couche (Si-rich Si_xN_y), déposée sur un substrat transparent, ne correspondait pas avec l'épaisseur visée, déterminée à l'aide d'une courbe de dépôt. La courbe de dépôt permet d'estimer la durée nécessaire du dépôt pour obtenir l'épaisseur visée. Puisque la courbe d'étalonnage est réalisée à partir de dépôts faits sur des substrats de silicium, et que le filtre est réalisé sur un substrat transparent (Pyrex ou quartz), nous avons émis l'hypothèse que la nature du substrat pourrait influencer le dépôt, et que pour un même temps de dépôt, l'épaisseur finale serait différente pour un substrat de silicium ou transparent.

Pour essayer de valider cette hypothèse, nous avons placé un substrat de silicium (échantillon 1) et un substrat de verre (échantillon 2) dans le réacteur PECVD. Chaque échantillon avait une épaisseur d'environ 500 μm afin d'obtenir une distance surface échantillon / plasma indentique. Nous avons lancé la recette du Si-rich Si_xN_y pendant 535 secondes, permettant de faire le dépôt sur les deux échantillons en même temps, et d'écarter l'hypothèse de la non-reproductibilité de la recette. A l'aide de l'ellipsomètre et d'un model de Tauc-Lorentz, nous avons mesuré une épaisseur de Si-rich Si_xN_y 135,8 nm sur l'échantillon 1 et une épaisseur de 122,0 nm sur l'échantillon 2. Cette expérience pourrait confirmer notre hypothèse puisque les épaisseurs sont différentes selon la nature du substrat. Toutefois, pour en avoir la certitude, une mesure de l'épaisseur physique de la couche à l'aide d'un profilomètre doit être envisagée. Il se peut que la couche possède une orientation cristalline, auquel cas le model utilisé par ellipsométrie ne permet pas de déterminer avec précision l'épaisseur physique, mais uniquement celle liée aux réflexions dans la couche. Nous avons ensuite déposé la recette du SiO_x par-dessus la couche de Si-rich Si_xN_y sur les deux échantillons en même temps. Toujours à l'aide de l'ellipsomètre et d'un model à deux couches spécialement développé, nous avons mesuré la même épaisseur de SiO_x sur les deux échantillons (105,3 nm sur l'échantillon 1 et 104,8 nm sur l'échantillon 2).

Ce résultat paraît plausible puisque le SiO_x a été déposé sur les mêmes surfaces de Si-rich Si_xN_y . Il faut donc tenir compte de la nature du substrat lors du dépôt de la première couche

Si-rich Si_xN_y . Le temps requis pour le premier dépôt doit être estimé à partir d'une courbe de dépôt spécifique, réalisée à partir de substrats identiques à celui du filtre. La figure 4.1 montre la différence entre une courbe de dépôt réalisée à partir d'un substrat de silicium, et celle réalisée à partir d'un substrat de Pyrex. Cette courbe est centrée sur la durée nécessaire pour déposer la première couche Si-rich Si_xN_y (117,5 nm). On remarque que pour une même durée de dépôt, la couche de Si-rich Si_xN_y est entre 5 et 10 nm plus fine sur le substrat de Pyrex.

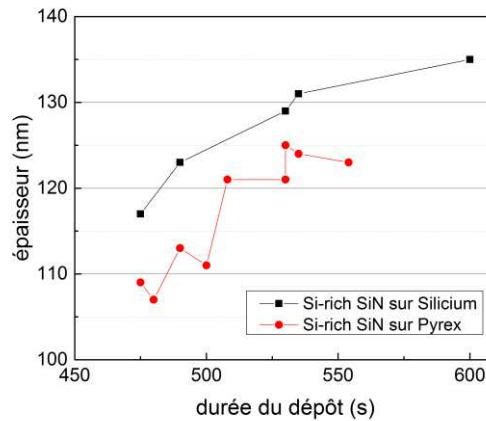


Figure 4.1 : Courbe de dépôt du Si-rich Si_xN_y . Epaisseur de la couche de Si-rich Si_xN_y en fonction de la durée du dépôt, sur un substrat de silicium (noir) et un substrat de Pyrex (rouge)

4.3 Réalisation du filtre

Le substrat utilisé pour fabriquer le filtre interférentiel PECVD est un wafer de quartz de 4 pouces. Puisque le réacteur PECVD ne possède pas de système de mesure de l'épaisseur intégré, avant chaque dépôt sur le substrat, plusieurs dépôts sont réalisés sur des échantillons test afin d'extraire le temps de dépôt requis pour obtenir l'épaisseur visée. Le temps de dépôt est préalablement estimé à l'aide de la courbe de dépôt évoquée dans la section 4.3. La première couche de matériau à fort indice de réfraction (Si-rich Si_xN_y) est déposée sur le substrat. Cette couche est caractérisée (épaisseur et propriétés optiques) avec l'ellipsomètre. En cas de différence entre l'épaisseur mesurée et l'épaisseur visée, une simulation est effectuée pour modifier légèrement les épaisseurs des cinq couches restantes, et s'assurer que la réponse spectrale du filtre interférentiel reste la plus proche possible du « *targeted spectrum* ». Il est également possible, dans le cas où l'épaisseur mesurée est inférieure à l'épaisseur visée, de compléter le dépôt en lançant la même recette. Une fois la première couche jugée satisfaisante, la deuxième couche de matériau à faible indice de réfraction (SiO_x)

est déposée et caractérisée, et ainsi de suite jusqu'à la sixième couche. Le procédé de fabrication du filtre est résumé dans le diagramme ci-après (figure 4.2).

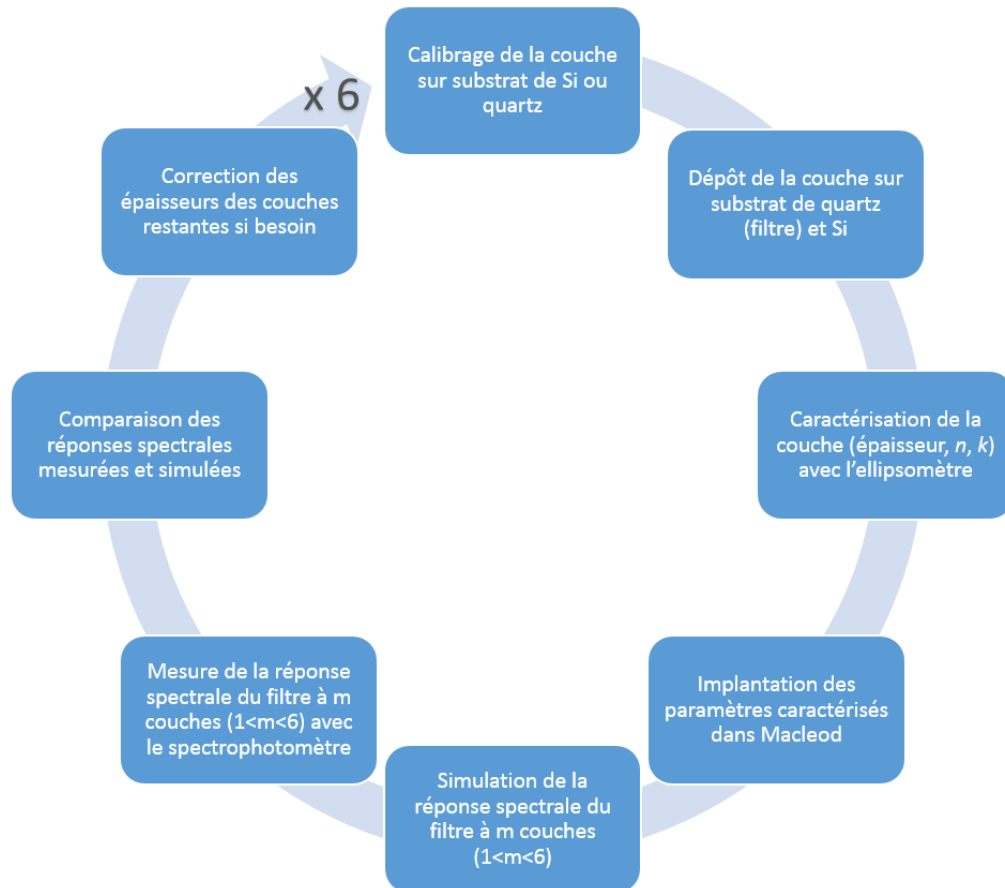


Figure 4.2 : Méthodologie itérative utilisée pour la fabrication du filtre interférentiel avec la technique PECVD

CHAPITRE 5.

PERSPECTIVES D'AMELIORATION DU FILTRE INTERFERENTIEL PECVD

5.1 Modification de l'angle d'optimisation

Le filtre interférentiel conçu dans le chapitre 3 a été optimisé pour un angle d'incidence de 0° . C'est à dire que sa réponse spectrale est la plus proche du « *targeted spectrum* » lorsque les rayons lumineux traversent le filtre avec un angle d'incidence de 0° par rapport à la normale. Nous avons vu que les sources lumineuses utilisées dans les lampadaires de rue possèdent un cône d'émission large (70°) [32] afin de couvrir une surface illuminée au sol la plus grande possible. Il est important de remarquer que les rayons lumineux émis de la source avec un angle d'incidence de 70° parcourent une distance beaucoup plus élevée pour atteindre le sol, que les rayons lumineux émis avec un angle d'incidence de 0° , comme expliqué sur la figure 5.1a. Si h est la distance parcourue par les rayons d'incidence nulle pour atteindre le sol, alors les rayons dont l'incidence est de 70° parcourront une distance de $h \cdot (1/\cos(70^\circ))$, soit environ $3 \cdot h$. Puisqu'ils parcourent une distance plus élevée, ces rayons seront davantage atténués, et leur intensité lumineuse au niveau du sol plus faible. Pour compenser, les fabricants ont développé des LED dont l'intensité lumineuse est plus élevée sur les côtés du cône d'émission qu'au centre, comme par exemple la LED Philips *SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5* utilisée comme source lumineuse lors de nos simulations, et dont la répartition d'émission est représentée dans la figure 5.1b. Cette configuration permet d'obtenir une tâche lumineuse d'intensité uniforme sur le sol.

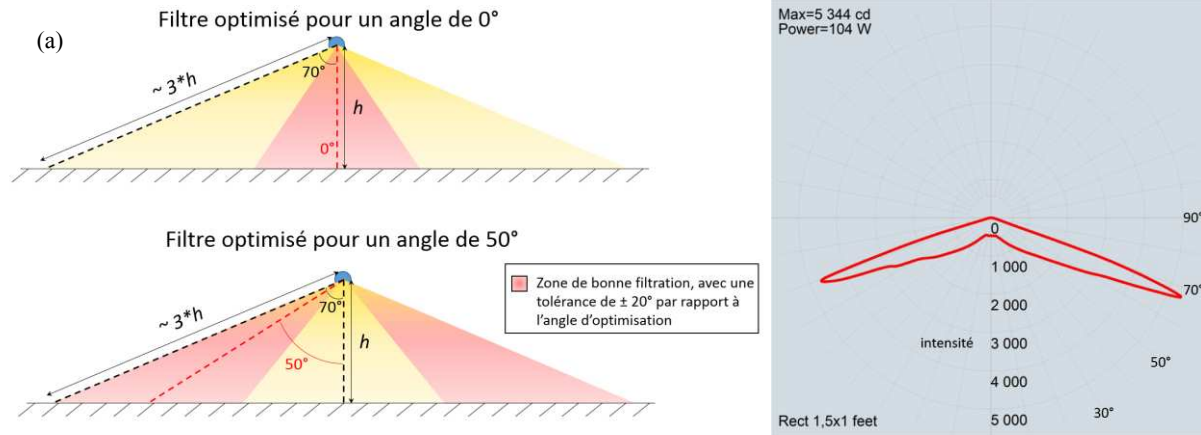


Figure 5.1 : (a) Illustration du cône d'émission d'une source lumineuse. (b) Emission de la LED Philips SVM StreetView 90W48LED4K-G2-LE5 en fonction de l'angle d'incidence.

Bien que la réponse spectrale du filtre optimisé à 0° ne dépende peu de l'angle d'incidence, comme vu dans la section 3.1.4.2, cet angle ne correspond pas à l'angle d'intensité lumineuse maximale. C'est pour cette raison qu'il pourrait être intéressant de concevoir un autre filtre interférentiel dont la réponse spectrale se rapproche le plus du « *targeted spectrum* » pour l'angle avec lequel la lumière est la plus intense, afin de la filtrer encore plus efficacement. Il faudrait donc, d'après la figure 5.1b, que le filtre soit optimisé pour un angle d'incidence compris entre 50° et 70° (-50° et -70° par symétrie). Cet intervalle de 20° nous vient des résultats montrés sur la figure 3.7. D'après cette figure, on remarque que le spectre de transmission de la LED est quasiment identique pour des angles de 0° , 10° et 20° , ce qui nous laisse une marge de $\pm 20^\circ$ autour de l'angle d'incidence pour lequel le filtre a été optimisé. En concevant par exemple un filtre optimisé pour un angle de 50° , sa réponse spectrale devrait être acceptable pour des angles d'incidence compris entre 30° et 70° (-30° et -70°), jusqu'à la limite du cône d'émission de la LED, comme illustré sur la figure 5.1a (partie inférieure).

5.2 Simulation d'un filtre interférentiel optimisé pour un angle de 55°

Nous avons choisi de simuler une structure à 6 couches d'un filtre interférentiel optimisé pour un angle de 55° à l'aide d'Essential MacLeod, en utilisant les mêmes matériaux que pour le premier filtre. Cette structure est détaillée dans le tableau 5.1

	matériau	indice de réfraction	épaisseur
couche 6	SiO _x (LRI)	1.47	496.9 nm
couche 5	Si-rich Si _x N _y (HRI)	2.39	246.3 nm
couche 4	SiO _x (LRI)	1.47	391.5 nm
couche 3	Si-rich Si _x N _y (HRI)	2.39	359.9 nm
couche 2	SiO _x (LRI)	1.47	429.9 nm
couche 1	Si-rich Si _x N _y (HRI)	2.39	101.2 nm
substrat	Quartz	1.46	500 μm

Tableau 5.1 : Structure détaillée d'un filtre interférentiel à 6 couches optimisé pour un angle d'incidence de 55°.

Nous avons simulé la réponse spectrale du filtre interférentiel PECVD optimisé à 55° (figure 5.2a). Nous avons ensuite simulé le spectre de transmission de la LED Philips *SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5* à travers ce filtre PECVD dans la figure 5.2b (ligne continue bleue). Pour comparer, nous avons simulé le spectre de cette même LED transmis à travers un filtre interférentiel à 16 couches fabriqué par pulvérisation cathodique, lui aussi optimisé pour un angle de 55° (ligne pointillée rouge).

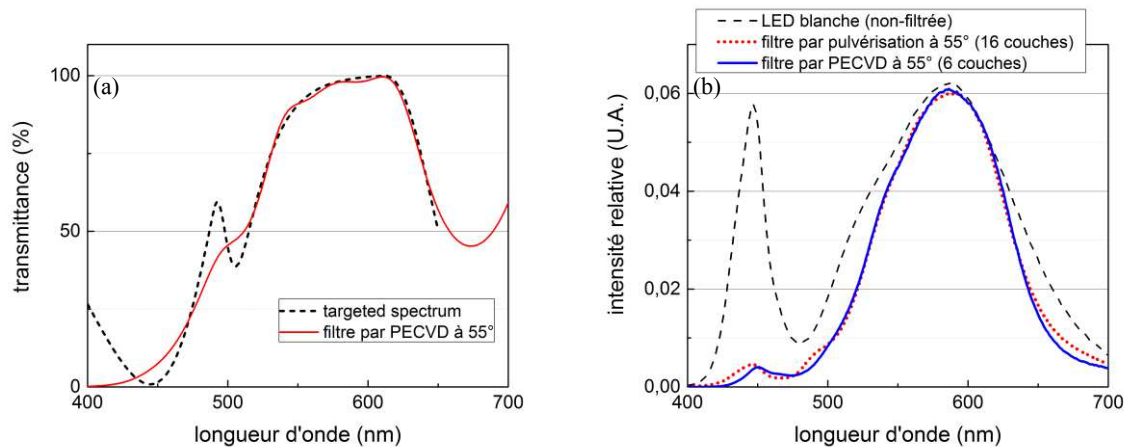


Figure 5.2 : (a) Simulation de la réponse spectrale d'un filtre interférentiel à 6 couches fabriqué par PECVD et optimisé pour un angle de 55°. (b) Simulation du spectre d'une LED blanche transmis à travers un filtre interférentiel fabriqué par PECVD (6 couches) et à travers un filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation cathodique (16 couches), tous deux optimisés pour un angle de 55°.

La réponse spectrale du filtre PECVD optimisé à 55° est comparable à celle du filtre optimisé à 0° (cf. chapitre 3). Il est donc tout à fait possible de modifier la structure du filtre pour l'optimiser à différents angles d'incidence, dépendamment de la source lumineuse utilisée. Le spectre d'émission de la LED à travers le filtre (figure 5.2b) est lui aussi comparable à celui obtenu dans la figure 3.6b du chapitre 3.

5.2.1 Influence de l'angle d'incidence sur la réponse spectrale

De la même manière que pour la section 3.1.4.2, nous avons simulé le spectre de la LED blanche transmis à travers ce filtre interférentiel à 6 couches optimisé pour un angle de 55° sur une large gamme d'angles d'incidence, de 0° à 80° . A titre de comparaison, nous avons également simulé l'émission de cette même LED à travers un filtre interférentiel à 16 couches fabriqué par pulvérisation cathodique et optimisé pour un angle de 55° , sur la même gamme d'angles d'incidence (figure 5.3).

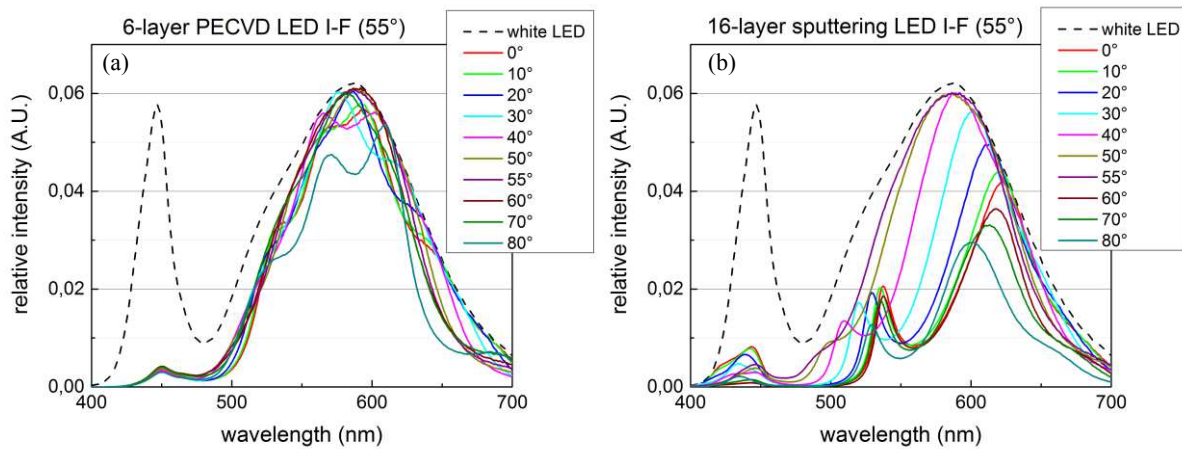


Figure 5.3 : Spectre de la LED blanche Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5 transmis à travers le filtre interférentiel 6 couches fabriqué par PECVD (a) et à travers le filtre interférentiel 16 couches fabriqué par pulvérisation cathodique (b), pour différents angles d'incidence. Les deux filtres ont été optimisés pour un angle d'incidence de 55° .

Tout comme dans la section 3.1.4.2, Cette simulation montre que le spectre d'émission est moins perturbé par la variation d'angle d'incidence lorsque que le filtre interférentiel fabriqué par PECVD est appliqué à la LED blanche (figure 5.3a), contrairement au filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation cathodique, qui lui subit d'importantes variations de spectre (figure 5.3b). La seule différence est que cette fois-ci, la meilleure réponse spectrale est obtenue pour un angle de 55° . Pour les angles d'incidence correspondant aux intensités les plus élevées de la LED, de 40° à 70° , la filtration est très bonne pour le filtre fabriqué par PECVD : Les longueurs d'onde bleues, ainsi que les rouges et proches infrarouges sont correctement atténués. Les raisons qui expliquent les faibles variations de réponse spectrale du filtre fabriqué par PECVD sont les mêmes que celles évoquées dans la section 3.1.4.2.

5.2.2 Influence de l'angle d'incidence sur le rendu colorimétrique

L'uniformité des couleurs de la tâche lumineuse au sol est un critère essentiel pour proposer à l'utilisateur un éclairage confortable. Pour cela, l'influence de l'angle d'incidence sur la couleur de la lumière doit être la plus faible possible. Afin d'avoir une idée du rendu colorimétrique du filtre interférentiel PECVD optimisé pour un angle de 55° , nous avons simulé la couleur de la lumière la LED blanche sur une échelle de température CCT en fonction de l'angle d'incidence (figure 5.4), en nous basant sur les spectres d'émission calculés dans la figure 5.3. Pour comparer, nous avons également simulé la couleur de la LED blanche à travers le filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation et optimisé pour un angle de 55° .

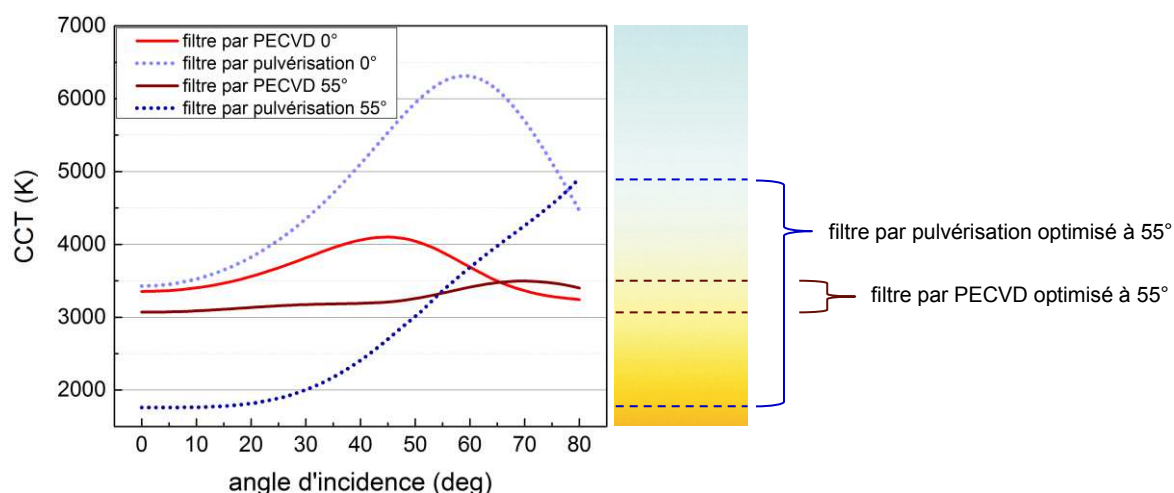


Figure 5.4 : Température de couleur (CCT) en Kelvin de la LED blanche Philips SVM Streetview 90W48LED4K-G2-LE5 à travers le filtre interférentiel fabriqué par PECVD et à travers le filtre interférentiel fabriqué par pulvérisation, en fonction de l'angle d'incidence.

Les résultats de cette simulation sont similaires à ceux présentés dans la section 3.1.4.3 : sur l'ensemble du cône d'émission de la LED, la température de la lumière provenant du filtre fabriqué par PECVD reste à l'intérieur d'un intervalle restreint, compris entre 3100 et 3500 K (figure 5.4, ligne continue marron). Cette faible variation de température est quasiment imperceptible pour un œil humain, et correspond à une teinte jaune pâle. Avec ce filtre fabriqué par PECVD, la tâche lumineuse sur le sol apparaîtra de couleur uniforme. Cette teinte jaune pâle se situe dans l'intervalle de températures de couleur provenant de l'éclairage urbain, généralement comprises entre 2000 K (lampe à vapeur de sodium) et 4000 K (lampe à

iodures métalliques ou lampe à vapeur de mercure). A l'inverse, la température de la lumière du filtre fabriqué par pulvérisation se situe dans un intervalle plus large, de 1700 à 4900 K (figure 5.4, ligne continue bleu foncé). Cette variation de température importante entraînera une tâche de couleur non uniforme sur le sol qui pourrait être perceptible par l'utilisateur. Enfin, le rendu colorimétrique du filtre PECVD optimisé à 55° est encore meilleur que le rendu colorimétrique du filtre PECVD optimisé à 0° , puisque les variations de température se situent dans des intervalles de 400 K et 900 K respectivement.

5.3 Conclusion

Nous avons démontré ici qu'il est possible d'adapter la structure du filtre interférentiel PECVD en fonction du type d'éclairage afin d'obtenir une filtration plus efficace. Pour un éclairage de type lampadaire, avec un large cône d'émission, il serait judicieux d'utiliser un filtre optimisé pour des angles d'incidence compris entre 50° et 70° puisque l'intensité lumineuse est plus élevée sur les bords du cône d'émission. Au contraire, pour un éclairage de type projecteur où l'intensité lumineuse est plus élevée au centre du cône d'émission, un filtre optimisé pour un angle de 0° conviendrait. Le choix de l'angle d'incidence pour lequel le filtre est optimisé se fera en fonction de la répartition d'émission de la source lumineuse, comme celle présentée dans la figure 5.1b à titre d'exemple.

CHAPITRE 6.

CONCLUSION

Ce projet a permis de démontrer qu'il est possible d'utiliser la technique PECVD pour la fabrication de filtres interférentiels efficaces et à faible coût, destinés à l'éclairage LED. Nous avons mis en avant les avantages et la polyvalence de cette technique de dépôt, qui nous a permis de développer un matériau spécifique pour cette application : le nitrure de silicium enrichi en silicium (Si-rich Si_xN_y). Son fort indice de réfraction, son fort coefficient d'extinction dans le bleu ainsi que son absorption nulle dans le reste du spectre visible ont permis de simplifier la structure de ces filtres (seulement 6 couches, contre 16 au minimum avec la technique de pulvérisation) et d'obtenir une réponse spectrale stable sur large gamme d'angles d'incidence. Nous avons travaillé sur l'uniformité de l'épaisseur des couches de Si-rich Si_xN_y afin d'augmenter la reproductibilité du procédé de fabrication. Enfin, nous avons montré la possibilité d'adapter la structure du filtre en fonction du type d'éclairage, en optimisant la filtration pour l'angle d'incidence correspondant à l'intensité maximale de la source lumineuse.

Les filtres interférentiels fabriqués par pulvérisation cathodique peuvent représenter jusqu'à 70 % du coût total des dispositifs d'éclairage public à LED commercialisés par LEKLA Inc. En dépit de leur coût élevé, ces filtres doivent être utilisés afin de répondre à certaines normes (comme la norme BNQ 4930-100 au Québec) qui imposent de réduire les émissions de longueurs d'onde bleues provenant de l'éclairage public. Les filtres interférentiels fabriqués avec la technique PECVD sont une des solutions pour proposer des systèmes d'éclairage à LED efficaces, avec un effet sur la santé et l'environnement limité, pour un coût réduit, et qui respectent la norme BNQ 4930-100.

Bien que l'objectif principal de ce projet ait été réalisé, il offre de nombreuses perspectives de continuité. Tout d'abord, des travaux supplémentaires devraient être entrepris pour expliquer certains phénomènes que nous n'avons pas pu expliquer correctement, comme la corrélation entre la pression du plasma et l'uniformité de l'épaisseur du dépôt, ou encore l'effet de la nature de la surface sur le taux de déposition. Ensuite, des recherches pourraient être faites pour intégrer le filtre interférentiel dans le procédé de microfabrication des LED, en tant que couche de

passivation, puisque cette couche de passivation se fait par dépôt PECVD. Cela permettrait de réduire drastiquement la quantité de matériaux requis pour la fabrication du filtre. Enfin, dans l'optique d'une commercialisation de cette technologie, des travaux supplémentaires à différents niveaux sont obligatoires. Sur le plan industriel, il s'agit de rendre le procédé de fabrication du filtre reproductible et l'adapter pour une production de masse. Au niveau de la qualité et de la fiabilité, il faut s'assurer que le filtre supporte son environnement extérieur : résistance aux variations d'humidité et de température, résistance à l'usure mécanique et chimique (vent, pluie, sable, etc.), résistance aux irradiations UV et IR, adhésion durable des couches minces sur le substrat, etc. Finalement, au niveau juridique il faudrait protéger voir breveter cette technologie.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] D. A. Steigerwald *et al.*, “Illumination with solid state lighting technology,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 8, no. 2, pp. 310–320, 2002.
- [2] M. Bessho and K. Shimizu, “Latest trends in LED lighting,” *Electron. Commun. Japan*, vol. 95, no. 1, pp. 1–7, 2012.
- [3] A. De Almeida, B. Santos, B. Paolo, and M. Quicheron, “Solid state lighting review - Potential and challenges in Europe,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 30–48, 2014.
- [4] D. Gall, “Die Messung circadianer Strahlungsgrößen,” *Licht und Gesundh.*, pp. 114–132, 2004.
- [5] Philips Inc., “Effets physiologiques de la lumière,” 2009.
- [6] M. AUBE, “Multilayer Optical Interference Filter,” Patent WO 2014/047724 A1, 2014.
- [7] M. Chen, “Chlorophyll modifications and their spectral extension in oxygenic photosynthesis,” *Annu. Rev. Biochem.*, vol. 83, pp. 317–40, 2014.
- [8] K. J. Gaston and J. Bennie, “Demographic effects of artificial nighttime lighting on animal populations,” *Environ. Rev.*, vol. 8, no. January, pp. 1–8, 2014.
- [9] S. R. Pandi-Perumal *et al.*, “Melatonin antioxidative defense: Therapeutical implications for aging and neurodegenerative processes,” *Neurotox. Res.*, vol. 23, no. 3, pp. 267–300, 2013.
- [10] G. Di Bella, F. Mascia, L. Gualano, and L. Di Bella, “Melatonin anticancer effects: Review,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 14, no. 2, pp. 2410–2430, 2013.
- [11] Y. TOUITOU *et al.*, “La mélatonine, pour quoi faire ? Discussion,” *Bull. Acad. Natl. Med.*, vol. 189, no. 5, pp. 879–891.
- [12] S. M. Pawson, “LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of colour temperature,” *Ecol. Appl.*, vol. 23, no. 3, pp. 515–522, 2013.
- [13] D. Van Norren and L. F. Tiemeijer, “Spectral reflectance of the human eye,” *Vision Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 313–320, 1986.
- [14] R. Wiltchko, T. Ritz, K. Stapput, P. Thalau, and W. Wiltchko, “Two different types of light-dependent responses to magnetic fields in birds,” *Curr. Biol.*, vol. 15, no. 16, pp. 1518–1523, 2005.
- [15] T. Koonen, “Fabry–Perot Interferometer Filters,” in *Wavelength Filters in Fibre Optics*, Dr. Herbert Venghaus, Ed. 2006, pp. 271–287.

- [16] S. O. Kasap, *Optoelectronics and Photonics, Principles and Practices Second Edition*. Prentice Hall, 2012.
- [17] S. Irmer *et al.*, “Ultralow biased widely continuously tunable Fabry-Perot filter,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 434–436, 2003.
- [18] A. Spisser *et al.*, “Highly Selective and Widely Tunable 1.55- μm InP / Air-Gap Micromachined Fabry – Perot Filter for Optical Communications,” vol. 10, no. 9, pp. 1259–1261, 1998.
- [19] T. K. Bhattacharya, B. S. Verma, M. Kar, A. Basu, and B. Bhattacharya, “Fabrication of thin film interference filters in the near ultra-violet spectral region (200-340 nm),” *J. Opt.*, vol. 25, no. 4, pp. 223–231, 1996.
- [20] S. Franssila, *Introduction to Microfabrication Second Edition*, Wiley. 2010.
- [21] D. Garg, P. B. Henderson, R. E. Hollingsworth, and D. G. Jensen, “An economic analysis of the deposition of electrochromic WO₃ via sputtering or plasma enhanced chemical vapor deposition,” *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 119, no. 3, pp. 224–231, 2005.
- [22] F. Perry, A. Billard, and C. Frantz, “An investigation of the pulse characteristics on deposition rate of reactively sputtered titanium dioxide films synthesised with a low-frequency modulation of the discharge current,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 94–95, pp. 339–344, 1997.
- [23] M. Rezazadeh Sefideh, Z. Sadeghian, A. Nemati, S. P. Mohammadi, and M. Mozafari, “Effects of processing conditions on the physico-chemical characteristics of titanium dioxide ultra-thin films deposited by DC magnetron sputtering,” *Ceram. Int.*, vol. 41, no. 6, pp. 7977–7981, 2015.
- [24] I. Kars *et al.*, “Influence of thermal annealing on the structure and optical properties of d.c. magnetron sputtered titanium dioxide thin films,” *Surf. Interface Anal.*, vol. 42, no. 6–7, pp. 1247–1251, 2010.
- [25] Y.-H. Peng *et al.*, “24.3: 32-inch LCD TV Using Conventional PECVD Microcrystalline-Silicon TFTs,” *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 39, no. 1, p. 333, 2008.
- [26] S. P. Singh *et al.*, “Influence of PECVD deposited SiN_x passivation layer thickness on In_{0.18}Al_{0.82}N/GaN/Si HEMT,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 36, p. 365104, 2015.
- [27] A. El Amrani, A. Bekhtari, A. El Kechai, H. Menari, L. Mahiou, and M. Maoudj, “Efficient passivation of solar cells by silicon nitride,” *Vacuum*, vol. 120, pp. 95–99, 2015.
- [28] A. Gorin, A. Jaouad, E. Grondin, V. Aimez, and P. Charette, “Fabrication of silicon

- nitride waveguides for visible-light using PECVD: a study of the effect of plasma frequency on optical properties.,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 18, pp. 13509–13516, 2008.
- [29] P. Zermatten, A. Jaouad, S. Blais, A. Gorin, V. Aimez, and P. G. Charette, “Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Si-Rich Silicon Nitride Films Optimized for Waveguide-Based Sensing Applications in the Visible Range,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 11R, p. 110205, 2012.
- [30] S. S. Han, M. Ceiler, S. A. Bidstrup, P. Kohl, and G. May, “Modeling the Properties of PECVD Silicon Dioxide Films Using Optimized Back-Propagation Neural Networks,” *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. - Part A*, vol. 17, no. 2, pp. 174–182, 1994.
- [31] R. Homier *et al.*, “Antireflection coating design for triple-junction III-V/Ge high-efficiency solar cells using low absorption PECVD silicon nitride,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 3, pp. 393–397, 2012.
- [32] Philips Inc., “StreetView_SMV_SpecSheet,” 2016.
- [33] Z. Yin and F. W. Smith, “Tetrahedron model for the optical dielectric function of hydrogenated amorphous silicon nitride alloys,” *Phys. Rev. B*, vol. 42, no. 6, pp. 3658–3665, 1990.
- [34] J. F. Lelièvre *et al.*, “Correlation of optical and photoluminescence properties in amorphous SiNx:H thin films deposited by PECVD or UVCVD,” *Thin Solid Films*, vol. 511–512, pp. 103–107, 2006.